

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Určení obrobitelnosti nspecifikovaného materiálu

Determination of Machinability Nonspecific Material

Student:

Bc. Vojtěch Schreier

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jiří Kratochvíl, Ph.D.

Ostrava 2015

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Vojtěch Schreier**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Specializace: 20 Strojírenská technologie
Téma: **Určení obrobitelnosti nspecifikovaného materiálu**
Determination of Machinability Nonspecific Material

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Metody zjišťování obrobitelnosti.
3. Experimentální ověření obrobitelnosti daného materiálu.
4. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] KOCMAN, K.; PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 1. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, s. r. o., 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
- [2] VASILKO, K.; NOVÁK-MARCINČIN, J.; HAVRILA, M. *Výrobné inžinierstvo*. Prešov : Datapress Prešov. 2003, 424 s. ISBN 80-7099-995-0.
- [3] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábání*. Žilina : EDIS Žilina, 2007. s. 343. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [4] HUMÁR, A. *Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění*. Brno : CCB, s.r.o. Brno, 1995. 265 s. ISBN 80-85825-10-4.
- [5] SHAW, Milton C. *Metal Cutting Principles*. 2nd edition. New York : Oxford University Press, 2005. 651. p. ISBN 0-19-514206-3.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Kratochvíl, Ph.D.**

Datum zadání: 12.12.2014

Datum odevzdání: 18.05.2015




Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité prameny a literaturu.

V Ostravě 14.5.2015

Václav Scheidl

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), že ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výdělek její obhajoby.

V Ostravě: 14.5.2015

Vojtěch Schreier
.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Vojtěch Schreier

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Holasovice 26
747 74 Neplachovice

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

SCHREIER, V. *Určení obrobitelnosti nspecifikovaného materiálu: diplomová práce.* Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2015, 90 s. Vedoucí práce: Kratochvíl, J.

Tématem diplomové práce je určení obrobitelnosti nspecifikovaného materiálu. První část práce je věnována rozdělení a metodám zjišťování obrobitelnosti. Teoretická část se zaměřuje především na dlouhodobé zkoušky obrobitelnosti, resp. řezivosti, dle normy ISO 3685: 1993. Další kapitola popisuje veškeré zařízení použité při zkouškách obrobitelnosti, tzn. stroj, nástroj, přípravky a měřicí zařízení a průběh samotné zkoušky. Cílem praktické části práce je zjištění obrobitelnosti etalonového materiálu pro oceli a následné určení obrobitelnosti neznámého materiálu zkouškou trvanlivosti soustružnického nástroje s jednou řeznou hranou při podélném soustružení.

ANOTATION OF DIPLOMA THESIS

SCHREIER, V. *Determination of Machinability Nonspecific Material: Diploma Thesis.* Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Working, Assembly and Engineering Metrology, 2015, 90 p. Supervisor: KRATOCHVÍL, J.

The theme of this thesis is to determine the machinability of nonspecific material. The first part is devoted to the distribution and detection methods of machinability. The theoretical part focuses on long-term tests respectively machinability. cuttability according to ISO 3685: 1993. The next chapter describes all equipment used in the tests machinability, ie. machine tools, jigs and measuring equipment and the course of the test itself. The aim of the practical part is finding machinability of the standard material for steel machinability and subsequent determination of unknown material durability tests turning tool with one a longitudinal cutting edge when turning.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce, panu Ing. Jiřímu Kratochvílovi, Ph.D., za neocenitelnou odbornou pomoc při realizaci experimentu. Dále bych chtěl poděkovat panu Danielu Venglošovi za technickou pomoc. Poděkování patří také mému kolegovi Vojtěchu Blažencovi, který se podílel na testech. Také bych chtěl poděkovat VŠB – TU Ostrava, Katedře obrábění, montáže a strojírenské metrologie za možnost provedení experimentu a poskytnutí potřebného vybavení.

V Ostravě: 14. 5. 2015

Vojtěch Blaženc

podpis

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	9
0 Úvod.....	11
1 Teoretický rozbor problematiky	12
1.1 Pojem obrobitelnost	12
1.1.1 Obrobitelnost z pohledu ekonomického	14
1.1.2 Obrobitelnost z pohledu technologického a kvalitativního	14
1.1.3 Materiálové mechanické a tepelné vlastnosti	14
1.2 Obrobitelnost ocelí.....	17
1.2.1 Vlastnosti materiálů vyjádřené pomocí polárních diagramů	23
1.3 Značení obrobitelnosti	24
1.4 Příklad výpočtu skupin obrobitelnosti dle CNN.....	28
1.5 Zkoušky obrobitelnosti	30
1.5.1 Dlouhodobé zkoušky obrobitelnosti	30
1.5.2 Krátkodobé zkoušky obrobitelnosti	34
1.6 Řezné materiály a jejich poškození	36
1.6.1 Hlavní faktory ovlivňující opotřebení nástrojů.....	37
1.6.2 Mechanismy opotřebení nástrojů.....	38
1.6.3 Časový průběh opotřebení	47
2. Teoretický rozbor experimentu.....	48
2.1 Popis pomůcek použitých k provedení experimentu	48
2.1.1 Použitý stroj	48
2.1.2 Použitý nástroj	50
2.1.3 Držák destičky a řezná geometrie	51
2.1.4 Materiál obrobku, příprava	52
2.1.5 Dílenský mikroskop s periferiemi.....	55
2.1.5 Drsnoměr Mitutoyo Surftest řady SJ	55

3. Zpracování naměřených dat, vyhodnocení experimentu	56
3.1 Testování materiálu 12 050.1.....	57
3.1.1 Řezná rychlost $v_c = 100 \text{ m.min}^{-1}$	57
3.1.2 Řezná rychlost $v_c = 125 \text{ m.min}^{-1}$	61
3.1.3 Řezná rychlost $v_c = 160 \text{ m.min}^{-1}$	64
3.1.4 Řezná rychlost $v_c = 200 \text{ m.min}^{-1}$	67
3.1.5 Grafy závislostí $VB = f(t)$, $T = f(v_c)$	70
3.2 Testování nspecifikovaného materiálu.....	73
3.2.1 Materiál č. 1	73
3.2.2 Materiál č. 2	77
3.3 Porovnání materiálů dle dosažené drsnosti povrchu.....	80
3.4 Tříska a její tvar při obrábění.....	81
4. Závěr	83
5. Seznam použité literatury	85
6. Seznam obrázků a tabulek	88

Seznam použitých zkratk a symbolů

Značka	Popis	Jednotka
A	Tažnost	[%]
a	Zrychlení	[m.s ⁻¹]
a _p	Hloubka řezu	[mm]
D	Průměr polotovaru po odebrání třísky	[mm]
DIN	Deutsche Industrie-Norm – Německá technická norma	
f	Posuv	[mm]
HB	Tvrdost dle Brinella	[HB]
HRC	Tvrdost podle Rockwella	[HRC]
ISO	International Organization for Standardization – Mezinárodní organizace pro normalizaci	
L	Obrobená délka	[mm]
KB	Šířka žlábků	[mm]
KF	Vzdálenost žlábků od čela	[mm]
Kchs	Koeficient chemického složení	[-]
KM	Střední vzdálenost žlábků	[mm]
KT	Hloubka žlábků	[mm]
K _v	Index obrobitelnosti	[-]
m	Hmotnost	[kg]
n	Otáčky	[min ⁻¹]
P _p	Příkon	[W]
q	Kvociet obrobitelnosti	[-]
Ra	Drsnost povrchu, střední aritmetická úchylka	[μm]
Re	Mez kluzu	[MPa]
Rm	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
Rz	Drsnost povrchu, největší výška nerovnosti	[μm]

S	Plocha	[mm ²]
SK	Slinutý karbid	[-]
t	Čas řezu	[min]
T	Trvanlivost nástroje	[min]
VB	Opotřebení na hřbetě	[mm]
VB _B	Opotřebení přímé části ostří průměrné	[mm]
VB _{Bmax}	Opotřebení hřbetu nástroje maximální	[mm]
VB _C	Opotřebení v oblasti špičky nástroje	[mm]
VBD	Vyměnitelná břitová destička	[-]
VBN	Opotřebení ve formě vrubu	[mm]
VB _{opt}	Opotřebení hřbetu optimální	[mm]
v _c	Řezná rychlost	[m.min ⁻¹]
v _f	Posuvová rychlost	[mm.min ⁻¹]
VR	Radiální opotřebení	[mm]
α _n	Úhel hřbetu	[°]
χ _r	Hlavní úhel nastavení	[°]
λ	Tepelná vodivost	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
λ _s	Úhel sklonu ostří	[°]

0 Úvod

Obrobitelnost materiálů je v současné době stále velmi aktuálním tématem, především z důvodu jejího velkého vlivu na výrobní náklady. Obrobitelnost a řezivost jsou vlastnosti, které k sobě neoddělitelně patří a při obrábění hrají velmi významnou roli. Chování různých materiálů s rozdílnými mechanickými vlastnostmi (u ocelí zejména pevnost), chemickým složením, za různých řezných podmínek při soustružení lze velmi těžce definovat; důvodem je velké množství možností kombinací řezných podmínek. Vzhledem k nedostatku času v praxi je nalezení nebo přiblížení se právě těmto optimálním hodnotám většinou složitý úkol. Také záleží na tom, zda budeme na obrobitelnost nahlížet z pohledu dosažené kvality povrchu obrobku, ekonomiky výroby, rychlosti výroby, apod., byť všechny faktory spolu v podstatě úzce souvisí.

Diplomová práce popisuje dlouhodobou zkoušku obrobitelnosti při podélném soustružení dle stále platných normativů obrobitelnosti, vycházející z normy ISO 3685: 1993. Zkouška obrobitelnosti proběhla v laboratořích katedry, na moderním simultánně řízeném soustružnicko-frézovacím centru DMG MORI SEIKI, vlastněném Katedrou obrábění, montáže a strojírenské metrologie.

Teoretická část práce pojednává o metodách zjišťování obrobitelnosti, o typech opotřebení nástrojů, dále popisuje sledovací zařízení a jeho periferie, použitý stroj, obráběný materiál a řezný materiál. Praktická část se zabývá vyhodnocením naměřených hodnot (funkční závislosti velikosti opotřebení hřbetu na čase $VB = f(t)$, $T - v_c$ závislosti), jejich porovnáním s dosaženou kvalitou obrobeného povrchu, typem a tvarem třísky.

Podklady k teoretické části práce byly získány z odborné literatury a z informací nabytých z dosavadního studia. Součástí experimentu bylo též měření sil při obrábění; bakalářskou práci na toto téma zpracoval student Vojtěch Blaženec.

1 Teoretický rozbor problematiky

V první kapitole je popsán teoretický rozbor problematiky obrobitelnosti materiálů. Kapitola je přehledně rozdělena do podskupin.

1.1 Pojem obrobitelnost

Pojem obrobitelnost lze z hlediska technologie obrábění vnímat jako míru schopnosti obráběného materiálu být zpracováván pomocí dané metody obrábění (soustružením, frézováním, vrtáním apod.).

Na kvantitativní, kvalitativní, ekonomické výsledky procesu řezání mají vliv fyzikální vlastnosti, mechanické vlastnosti a chemické složení obráběného materiálu. [1], [7]

Obrobitelnost kovových materiálů je jedním ze základních vlastností, které limitují hodnoty optimálních řezných podmínek. Obrobitelnost kovů nelze tedy stanovit absolutně měřitelnou jednotkou. Obrobitelnost určuje, zda zkoumaný materiál jde obrábět hůře nebo lépe než materiál jiný, ovšem za předpokladu, že se obrábí za stejných podmínek (řeznými podmínkami, řezným prostředím) shodným řezným materiálem a obrábění probíhá na tomtéž stroji. Takže jde v podstatě o srovnání zkoušeného materiálu (např. neznámého) a referenčního (etalonového) materiálu. Jednotné normativy obrobitelnosti zařazují oceli do tříd (skupin) s označením 1-20. Relativně nejhorší obrobitelnost má materiál s nejnižším číslem. Naopak nejlepší obrobitelnost má potom materiál s nejvyšším číslem. Obecně je možné posuzovat obrobitelnost podle toho, jaký má vliv na tvorbu třísky, podle jakosti povrchu obrobené součásti, popř. podle velikost řezné rychlosti při zvolené trvanlivosti břitů. [1], [8]

Míra obrobitelnosti materiálu by tedy měla dávat jasný pohled na to, jakým způsobem se bude materiál obrobku chovat při obráběcím procesu. Při srovnávání míry obrobitelnosti dvou různých materiálů je třeba uvažovat, že obrobitelnost je opravdu relativní pojem, který závisí na podmínkách právě aktuálních. Při výrobě určitého typu součásti je důležité si uvědomit, že výroba zahrnuje i další operace (frézování, vrtání, závitování...) a vyhodnocení komplexní obrobitelnosti je ve skutečnosti složitější.[8]

Z pohledu charakteristik obrobiteľnosti lze obrobiteľnosť a řezivost rozdělit na obrobiteľnosť a řezivost relativní a absolutní. Obrobiteľnosť a řezivost spolu souvisí a kritéria obrobiteľnosti jsou současně i kritérii řezivosti. [7]

- **Absolutní obrobiteľnosť:** je charakterizována buď funkčním vztahem a parametry s ním souvisejícími, anebo určitou velikostí dané veličiny charakterizující obrobiteľnosť.
- **Relativní obrobiteľnosť:** je charakterizována bezrozměrnými čísly, udávajícími poměr určité veličiny. Většinou jde o poměr velikosti dané veličiny, která se vztahuje k materiálu obrobku (řeznému materiálu) a veličiny, která odpovídá referenčnímu (etalonovému) materiálu.

Obrobiteľnosť a řezivost se nejčastěji hodnotí z hlediska velikosti opotřebení břitu řezného nástroje. K relativním charakteristikám patří především index obrobiteľnosti K_v , který popisuje vztah (1) a (2).

$$K_v = \frac{v_{T/VB} \text{ testovaného materiálu}}{v_{T/VB} \text{ referenčního materiálu}} \quad (1)$$

$$K_v = \frac{c_v \text{ test.mat.}}{c_v \text{ refer.mat.}} \cdot T^{\left(\frac{1}{m_{\text{test.mat.}}} - \frac{1}{m_{\text{refer.mat.}}}\right)} \quad (2)$$

Existuje několik možností, jak rychle a dostatečně přesně a objektivně stanovit obrobiteľnosť zatím neznámého, nově vyvinutého řezného a doposud netestovaného materiálu, nebo nově zavedeného, vysoce houževnatého, pevného a tvrdého materiálu, popř. jejich kombinací. Jedná se zejména o tyto vybrané možnosti [7]:

- míra závislosti na řezné rychlosti,
- dosažená drsnost obrobené plochy,
- velikost opotřebení břitu nástroje,
- množství energie potřebné k odřezání dané vrstvy materiálu,
- vztah k dosahované teplotě řezání,
- druh a tvar tvořící se třísky.

1.1.1 Obrobitelnost z pohledu ekonomického

Z ekonomického hlediska lze obrobitelnost hodnotit jako objem materiálu odřezaného za jednotku času, při použití optimálních řezných podmínek, za konstantního průřezu třísky, velikosti posuvové rychlosti, na jednom stroji jedním nástrojem. Objem odřezaného materiálu je přímo úměrný velikosti řezné rychlosti, která odpovídá dohodnuté, stanovené hodnotě trvanlivosti. V praxi se jedná o trvanlivost např. 5; 10; 15; 20 minut a kritériem obrobitelnosti je potom hodnota řezné rychlosti při dané trvanlivosti. [1]

Dalším kritériem obrobitelnosti může být např. velikost energie potřebné k odřezání určitého objemu materiálu opět danou řeznou rychlostí, nástrojem. Velikost energie potřebné k odřezání určíme pomocí tečné složky řezné síly F_z nebo posuvové složky F_x . Dalším kritériem z ekonomického pohledu může být např. velikost teploty řezání. [1]

Při posuzování obrobitelnosti by mělo být počítáno také s náklady na řezné nástroje, na stroje a strojní obsluhu. Také cena obráběného materiálu může v podstatě nepřímo ovlivnit jeho obrobitelnost.[8]

1.1.2 Obrobitelnost z pohledu technologického a kvalitativního

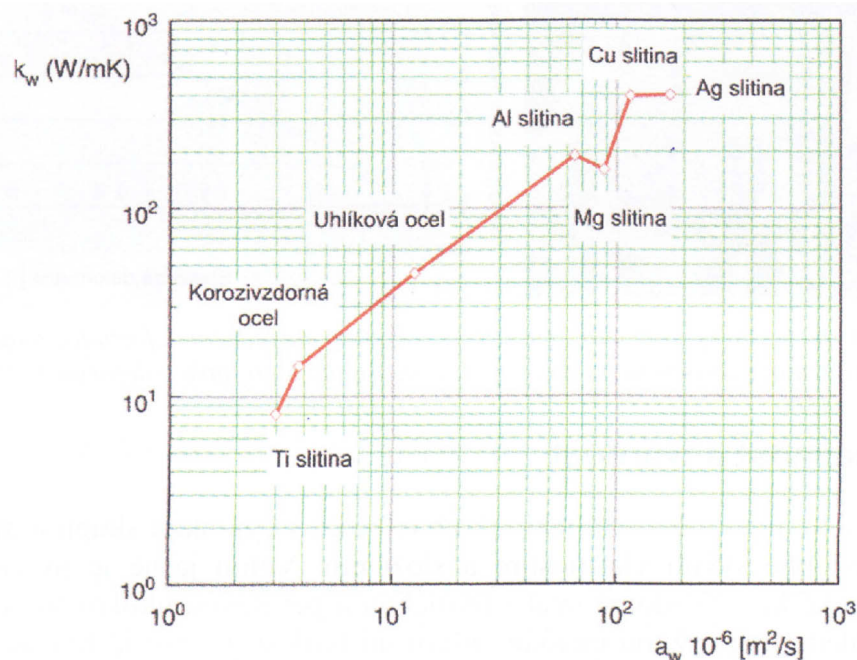
Z technologického hlediska hraje největší roli objemový součinitel, tzn. tvar a druh třísky. Hodnocení obrobitelnosti z pohledu kvalitativního souvisí s mírou dosažené drsnosti povrchu obráběním resp. s integritou povrchu nebo také s velikostí vnesených pnutí do povrchových vrstev. [1]

1.1.3 Materiálové mechanické a tepelné vlastnosti

Obrobitelnost kovů z pohledu ekonomického, kvalitativního závisí především na fyzikálních vlastnostech, chemickém složení a svou roli hraje také metalurgické zpracování. Mezi fyzikální vlastnosti, které největší mírou ovlivňují obrobitelnost, patří mechanické a tepelné vlastnosti. Obrobitelnost z hlediska tepelných vlastností

ovlivňuje tepelná vodivost, jelikož právě na ní závisí rychlost odvodu tepla z místa řezu.

Tepelná vodivost tedy výrazně ovlivňuje teplotu řezání. Už 1% nárůst hodnoty tepelné vodivosti (pro oceli) vede k poklesu procesní teploty až o desítky stupňů Celsia. Účinek měrného tepla je vysoký při obrábění feritických ocelí. Pokud při obráběcím procesu dochází k fázové přeměně, kterou charakterizují změny ve struktuře mezi feritickou a austenitickou ocelí, je hodnota měrného tepla u feritické oceli velmi závislá na teplotě – zvyšuje se až o 100 % v rámci teplotního intervalu, což vede k razantnímu zvýšení obrobitelnosti těchto ocelí. Materiály, které mají vysokou hodnotu tepelné vodivosti λ , jsou tedy logicky většinou lépe obrobitelné než kovy s nízkou tepelnou vodivostí, byť mají oba materiály stejnou pevnost. Příkladem může být dobrá obrobitelnost mosazi (velmi dobrá tepelná vodivost proti oceli) v porovnání s obráběním např. titanových slitin či některých nerezových ocelí. Např. měď má tepelnou vodivost $400 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, titan jen $17 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ – tyto velké rozdíly hrají roli ve volbě řezných podmínek, či potřebě chlazení apod. Obrázek 1 uvádí diagram, ze kterého je patrné, že legované materiály lze obrábět většími řeznými rychlostmi v případě použití řezných materiálů s vysokou ořezavostí a nízkou houževnatostí.



Obr. 1: Tepelná vodivost k_w a tepelná difuzivita a_w různých materiálů [8]

V materiálech majících malou tepelnou vodivost je teplo odváděno především břitem nástroje. Je velmi důležité volit určitou rovnováhu mezi tepelnou vodivostí

obrobku a řezného nástroje. Vliv tepelné vodivosti na obrobitelnost uhlíkových ocelí s HB 100 až 350 lze orientačně stanovit pomocí vztahu (3), který byl získán experimentálně. [1], [8]

$$v_t = \frac{\lambda^{0,6}}{\sigma_{Pt}^{1,8}} [\text{m.min}^{-1}] \quad (3)$$

Mechanické vlastnosti obráběného materiálu mají vliv na energetickou bilanci procesu obrábění a na intenzitu opotřebování bříty nástroje. Mechanické vlastnosti také ovlivňují jakost obrobené plochy, tvar a typ třísky. Při posuzování obrobitelnosti z hlediska mechanických vlastností hraje největší roli pevnost materiálu, houževnatost a tvrdost. Při zvyšování pevnosti a tvrdosti se obrobitelnost většinou zhoršuje (pokud se pohybujeme v oblasti konvenčního obrábění a neuvažujeme o obrábění vysokými posuvovými rychlostmi). [1], [8], [6]

Houževnatost, vlastnost, která se určuje rázovou zkouškou, má také zásadní vliv na obrobitelnost kovových materiálů. Platí pravidlo, že se zvyšující se mírou houževnatosti se obrobitelnost zhoršuje. Úzce však souvisí houževnatost s pevností. Pokud bude ocel s nižší pevností, potom má houževnatost větší vliv na obrobitelnost. S rostoucí pevností se vliv houževnatosti snižuje, kdy u vysoko pevnostních kovů je vliv houževnatosti na obrobitelnost relativně nízký. Houževnatost působí negativně na kvalitu obrobené plochy, má také nepřímý vliv na tvar třísky. Vliv tvrdosti kovů na jejich obrobitelnost je vázán na jejich houževnatost, např. při obrábění šedé litiny je výraznější než při obrábění houževnatějších materiálů.[1]

Při posuzování obrobitelnosti materiálů mají velmi výrazný vliv právě tvrdost a houževnatost, ale není pravidlem, že jsou rozhodujícím jednoznačným kritériem pro posouzení obrobitelnosti. Také není možno posuzovat obrobitelnost podle jedné vlastnosti (pevnosti, houževnatosti...). Například obrábění kovu s vysokou pevností v tahu; takový materiál může být lépe obrobitelný než kov s nízkou pevností v tahu, pokud mají rozdílnou houževnatost či tepelnou vodivost. Pokud se hodnocení obrobitelnosti provádí na základě mechanických vlastností, je nutné vždy brát v úvahu i další parametry, jako např. chemické složení, velikost zrna, mikrostrukturu, obsah legujících prvků, druh tepelného zpracování apod.[1]

Svůj význam při obrábění má i deformační zpevnění; pokud při obrobení dojde k deformačnímu zpevnění, vnější vrstva vykazuje vyšší hodnoty meze kluzu a tvrdosti. Deformační zpevnění v kombinaci s nízkou tepelnou vodivostí kovu může znamenat výrazné snížení obrobiteľnosti. K tomuto jevu dochází např. při obrábění austenitických ocelí. [8]

1.2 Obrobiteľnost ocelí

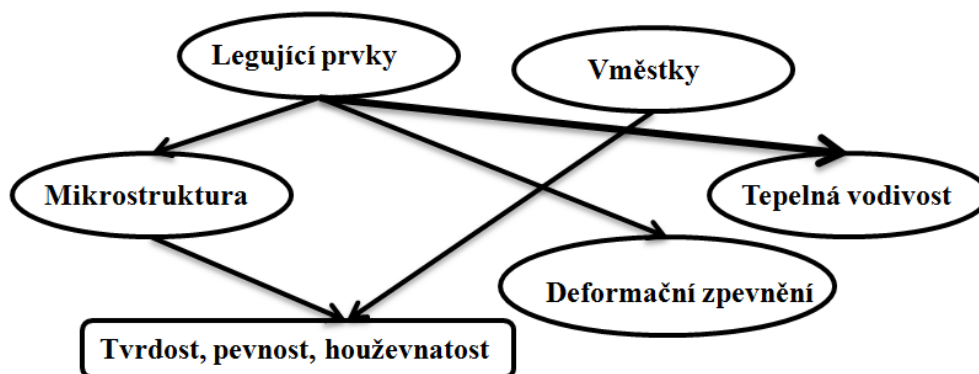
Z mechanických vlastností má na obrobiteľnost ocelí největší vliv jejich pevnost. Vliv tvrdosti není v celém jejich rozsahu monotónní. Oceli s tvrdostí menší než 150 HB vykazují obecně špatnou obrobiteľnost díky své vyšší houževnatosti. Až do tvrdosti okolo 220 HB nevykazuje míra obrobiteľnosti změny tvrdosti přímo úměrně, jelikož je obrobiteľnost ovlivňována jinými faktory (chemické složení, houževnatost...). Přiblížení přímé úměře přichází až po překročení tvrdosti přes hranici 240 HB, zde se obrobiteľnost zhoršuje přímo úměrně s tvrdostí, protože tvrdost převyšuje ostatní parametry (tzn., je nejvýraznější).

Vliv tvrdosti a houževnatosti na obrobiteľnost ocelí s tvrdostí vyšší než 240 HB lze vyjádřit experimentálně stanoveným vztahem (4)

$$v_{60} = \frac{c}{HB^{1,36} \cdot \delta^{1,01}} [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (4)$$

Kde: $c \approx 17,62 \cdot 10^6$, δ v %. Tento vztah neplatí pro oceli kalené a popuštěné na HB 200 ÷ 400 a pro oceli válcované za studena.

Na obrobiteľnost ocelí má vliv její chemické složení vyjádřené procentem prvků, které se do oceli dostávají při výrobě a metalurgickém zpracování, jmenovitě jde o prvky: C, Mn, F, O, H, Si, N, Sn, Pb a další legující prvky, které se přidávají do ocelí pro zlepšení mechanických vlastností: Cr, Ni, V, W, Mo, Co, Al, Ti. Prvky mají na obrobiteľnost různý vliv podle toho, jestli jsou v základní hmotě feritu rozpustné úplně, částečně, nebo jsou prvky karbidotvornými. Některé prvky jsou ve feritu rozpustné, a tvoří tak vměstky. Pokud jsou vměstky tvrdé, zhoršují obrobiteľnost takového materiálu a naopak.

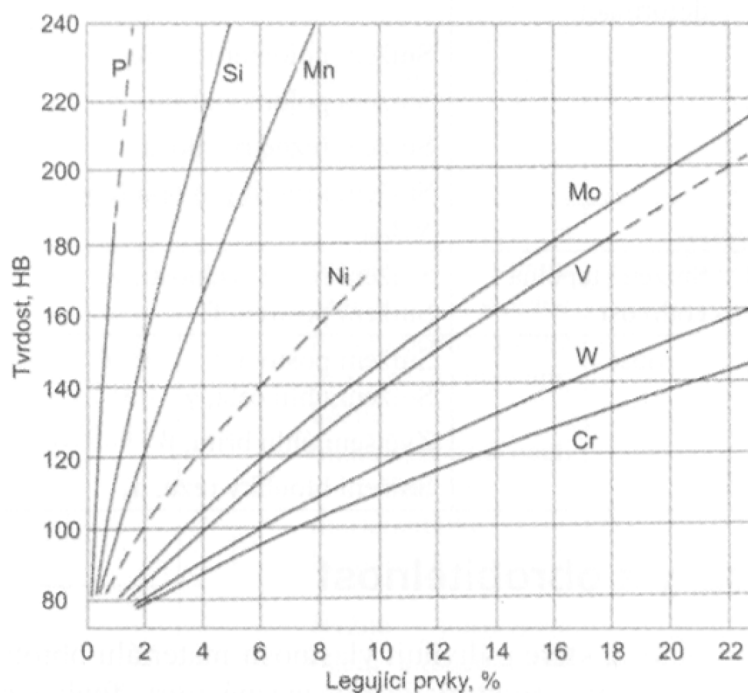


Obr. 2: Vztahy mezi některými vlastnostmi ovlivňujícími obrobitelnost ocelí[6]

Obrázek 2 zobrazuje hlavní materiálové vlastnosti, které ovlivňují obrobitelnost ocelí.

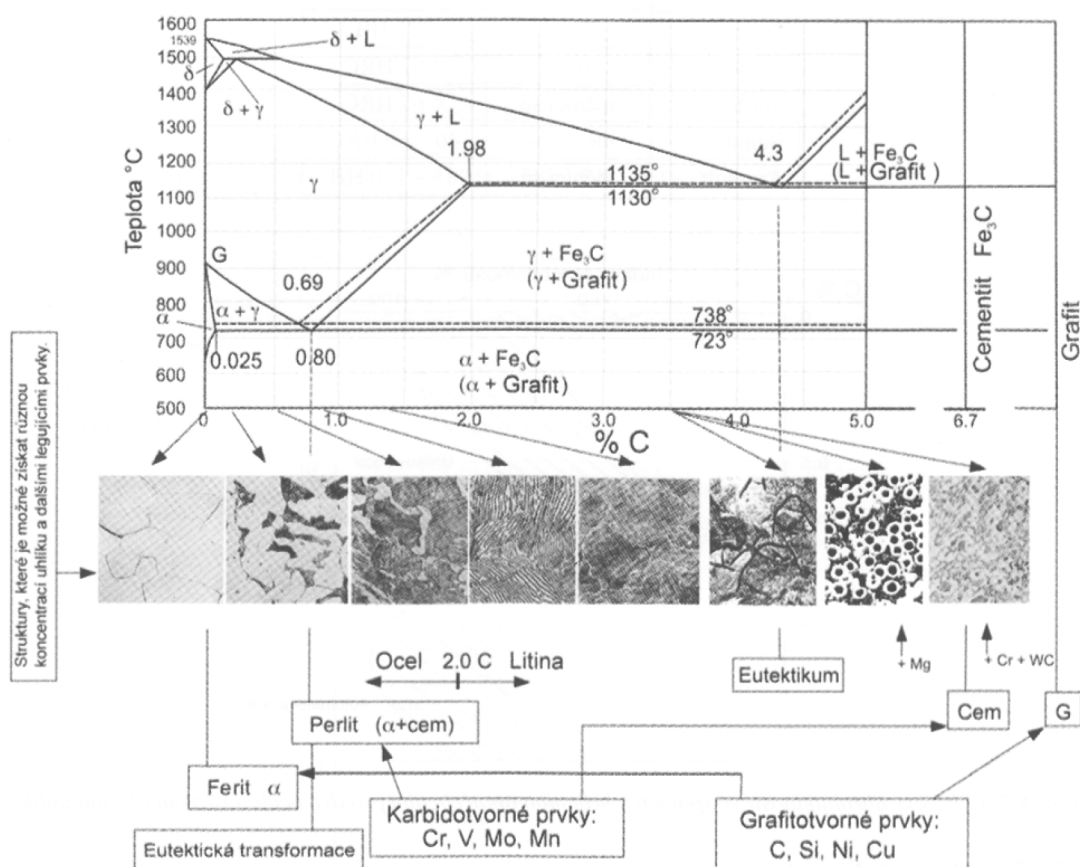
- **Legující prvky v oceli a jejich vliv na obrobitelnost**

Čisté železo obsahuje zhruba jen 0,04 % uhlíku a má tvrdost kolem 80 HB. Přidání legujících prvků způsobí zvýšení tvrdosti železa. Míru zvýšení tvrdosti přidáním některého prvku popisuje obrázek 2. [6], [8], [10]



Obr. 3: Zvýšení tvrdosti oceli přidáním některých prvků [6]

Pro nelegované, nízkolegované i nástrojové oceli je hlavním a nejdůležitějším prvkem uhlík. Další prvky – mangan, nikl nebo chrom jsou karbidotvornými prvky, které zvyšují odolnost materiálu proti opotřebení. Na obrázku 4 je diagram železo – karbid železa, kde je znázorněno, jaká struktura vzniká přidáním legujících prvků. [8]



Obr. 4: Binární diagram železo – uhlík [11]

Uhlík C: slučuje se s feritem na cementit (Fe_3C), který tvoří při pomalém ochlazování s feritem eutektoidní směs, tzv. perlit (vyskytuje se ve formě globulární nebo lamelární), který zvyšuje tvrdost a snižuje houževnatost. U nízkouhlíkových ocelí je vhodnější lamelární perlit, který snižuje houževnatost a po obrobení tak vzniká lepší povrch. Při rychlém ochlazování vytváří martenzitickou strukturu, která je velmi tvrdá, a tudíž špatně obrobitelná. Další struktura perlitu sorbit (velmi jemná) působí zvýšení tvrdosti, a tím zhorší obrobitelnost. Hůře se obrábí také struktura austenitická z důvodu velké zpevňovací schopnosti a vysoké houževnatosti. [1], [11]

Optimální obsah uhlíku pro dobrou obrobitelnost je v rozmezí $0,3 \div 0,35 \%$ (v případě legování manganem je to přibližně $0,15 \%$). Naproti tomu slitinové oceli, které obsahují $0,6 \div 1,2 \%$ uhlíku, je jeho vliv malý z důvodu převažujícího množství legujících prvků. [11], [1]

Mangan Mn: v oceli zvyšuje pevnost a tvrdost, tudíž s velkým obsahem manganu se obrobitelnost oceli zhoršuje. Je-li obsažen v množství $0,7 \div 1,3 \%$ (dle způsobu

výroby oceli) působí příznivě na obrobiteľnost oceli, protože snižuje její houževnatost. [1]

Křemík Si: působí příznivě na tvrdost a pevnost, a tím zhoršuje obrobiteľnost. Do obsahu 0,3 % u nízkouhlíkových ocelí zlepšuje obrobiteľnost. U legovaných ocelí nemá do obsahu 2 % na obrobiteľnost velký vliv. Křemík v oceli má desoxidační schopnost – tvorba vměstků SiO_2 , které podstatně, díky své tvrdosti, zhoršují obrobiteľnost. [1]

Síra S: zlepšuje obrobiteľnost ocelí při obsahu 0,08 ÷ 0,3 %. Síra snižuje houževnatost a má příznivé účinky na otěr a vznik třísky. Síry je využíváno z tohoto důvodu s výhodou např. u tzv. automatových ocelí. [1], [11]

Fosfor P: fosfor zlepšuje obrobiteľnost nízkolegovaných ocelí (do 0,25 % obsahu). [1]

Olovo Pb: tento prvek je v železe nerozpustný, a vytváří tak disperzi malých částeckek. Toto působí příznivě na obrobiteľnost, nesnižuje pevnost ocelí, tvar třísky je výhodný. [1]

Chrom Cr: vliv tohoto prvku na obrobiteľnost je malý v případě obsahu do 0,5 %. Čím více chromu je v oceli obsaženo, tím horší je obrobiteľnost. Chrom zvyšuje tvrdost a pevnost feritu. [1]

Nikl Ni: podobně jako chrom zvyšuje tvrdost a pevnost feritu, v němž je rozpuštěn. Pokud jeho obsah přesáhne 8 %, je ocel velmi špatně obrobiteľná. [1]

Wolfram W: je částečně rozpuštěn a do jisté míry tvoří také karbidy. Obrobiteľnost oceli wolfram zhoršuje. [1]

Molybden Mo: je rozpuštěn ve feritu a také jako wolfram vytváří karbidy. Pokud je obsažen do 0,4 %, obrobiteľnost nezhoršuje. S vyšším obsahem míra obrobiteľnosti značně klesá. [1]

Vanad V: je ve feritu částečně rozpuštěn, působí příznivě na jeho pevnost a částečně tvoří karbidy, které díky své tvrdosti zvyšují intenzitu otupování břitů

nástroje. Čím je obsah tohoto prvku větší, tím je obrobiteľnosť horšia. Obrobiteľnosť chrom-vanadových ocelí je však lepšia než obrobiteľnosť ocelí chrom-niklových. [1]

Kobalt Co: není karbidotvorným prvkom, je rozpusten v feritu, kde zvyšuje jeho pevnosť. Obrobiteľnosť ocelí legovaných kobaltom je špatná v celom rozsahu. [1]

- **Vmestky v ocelích a jejich vliv na obrobiteľnosť**

Vmestky v ocelích se vyskytují v každém případě a jsou nežádoucí, ale lze je vytvořit i úmyslně vzhledem ke zlepšení některých vlastností ocelí. Mezi nechtěné nečistoty a vmestky můžeme zařadit oxidy, sulfidy (např. MnS). Záměrně vytvořené vmestky mají za úkol zlepšit obrobiteľnosť, a právě zde lze zařadit tzv. automatové oceli, které obsahují množství síry, popř. olova. Další možností je tzv. ošetření vápníkem, který tvoří nečistoty ve formě oxidů a sulfidů a mění je na hlinitany, které jsou shromažďovány v obalu sulfidu vápenatého. Tímto způsobem jsou vyráběny některé korozivzdorné oceli, např. korozivzdorná automatová ocel X8CrNiS 18-9 s obsahem síry $0,15 \div 0,35$ %. Oproti nesířené verzi této oceli, která obsahuje pouze 0,03 % síry, má automatová ocel o mnoho lepší obrobiteľnosť. Důležitým faktem je to, že sířená, popř. vápněná verze nerezových ocelí, je náchylnější na vznik koroze. [1], [8]

- **Výchozí stav materiálu obráběné součásti**

Materiál obrobku je ve stavu, v jakém byl zpracován metalurgickými pochody a dodán k obrábění ve formě polotovaru. Záleží na způsobu výroby polotovarů, na tepelném zpracování, zda byl materiál vyráběn válcováním nebo tažením buď za tepla, nebo za studena.

Nejčastěji je materiál polotovaru žíhaný. Žíháním je docíleno lepší obrobiteľnosti. Rozlišujeme několik způsobů žíhání a tepelného zpracování:

- 1/ **normalizování** – tj. zahřátí oceli na teplotu $815 \div 925$ °C a ochlazením na vzduchu se docílí u nízkouhlíkových ocelí snížení pevnosti a lepší obrobiteľnosti materiálů po kování a válcování.

- 2/ **podkritické žíhání na měkko** – ocel se zahřeje na teplotu $535 \div 685\text{ }^{\circ}\text{C}$ a ochladí na vzduchu. Používá se po operacích kování a mezi operacemi hrubováním a dokončováním – dochází k odstranění vnitřních pnutí. [1]
- 3/ **normalizační žíhání** – ocel se zahřeje na teplotu $815 \div 925\text{ }^{\circ}\text{C}$ a pomalu se ochlazuje v peci, tím dojde ke zlepšení obrobitelnosti u ocelí s obsahem do 0,4 % uhlíku. Naopak u ocelí s vyšším obsahem uhlíku se tímto zpracováním obrobitelnost zhorší, z důvodu dosažení vyšší tvrdosti struktury. [1]
- 4/ **cyklové žíhání** – touto technikou žíhání s kontrolovanou dobou chlazení lze docílit lamelární perlit ve struktuře. Takový materiál je poté lépe obrobitelný a lamelární perlit působí příznivě na kvalitu obrobené plochy. [1]
- 5/ **kalení s rychlým ochlazením** – kalí se do oleje nebo vody a následně se popouští pod kritickou teplotu, přičemž vznikne jemná sferoidní struktura, zvýší se tvrdost $200 \div 300\text{ HB}$. Kvalita obrobené plochy je potom velmi dobrá a využívá se při výrobě ozubení – dokončovací způsoby. [1]

Obrobitelnost ocelí závisí na způsobu výroby a tepelném zpracování. Oceli, které se vyrábí v Siemens - Martinských pecích, mají přirozeně vyšší obsah síry, a jsou tak lépe obrobitelné než stejné oceli vyráběné v elektrických pecích nebo konvertorech. Tyto oceli však mají vyšší pevnost. [1], [6], [8]

Čím více je materiál redukován (válcováním ingotu - tažením - kováním), tím horší je jeho obrobitelnost. Válcováním za tepla nebo kováním se u ocelí zvyšuje jejich tvrdost (více u ocelí s obsahem uhlíku větším než 0,4 %). Také tažením za studena se zvyšuje tvrdost a pevnost a snižuje se houževnatost - rychleji než tvrdost. A to je důvod, proč je u polotovarů tažených za studena lepší obrobitelnost než u polotovarů tažených za tepla. [6], [8]

- **NÍZKOLEGOVANÁ OCEL**

Skupina nízkolegovaných ocelí zahrnuje oceli s nízkým až středním obsahem hliníku. Patří zde oceli konstrukční i cementační. Tyto oceli mají malý obsah legur

a mají feritickou mikrostrukturu. Oceli obvykle nebývají kalitelné. Obrábění nízkouhlíkových ocelí ($< 0,3 \text{ \% C}$) souvisí s problémem tvorby nárůstků na všech typech řezných nástrojů. Tyto oceli tvoří často dlouhou třísku. U ocelí s vyšším obsahem uhlíku (až $0,5 \text{ \%}$) se nárůstek vytváří jen výjimečně. Oceli legované malým procentem manganu a chromu, popř. niklem a molybdenem, bývají dobře obrobitelné. [8], [11]

Nízkolegované oceli se liší díky různému obsahu uhlíku svým chováním při obrábění. Obsah uhlíku rozhoduje o typu opotřebení (adhezivní nebo abrazivní). Jednofázové materiály, obsahující málo uhlíku, tvoří při obrábění delší třísku, a způsobují tak spíše adhezivní opotřebení (tříska je v kontaktu s řezným nástrojem delší dobu). Řešením je použití řezného materiálu, který je houževnatější (není křehký a má větší ohybovou pevnost). Naopak řezáním materiálu o vyšším obsahu uhlíku vede k abrazivnímu opotřebení – řešením je použití řezného materiálu s vyšší pevností v tlaku. Opotřebení na hřbetě se nemusí vyskytovat při použití povlakovaných nástrojů, ale zatížena bývá čelní plocha nástroje (velké zatížení pohybem třísek o nástroj), důsledkem je výlomové opotřebení. [8]

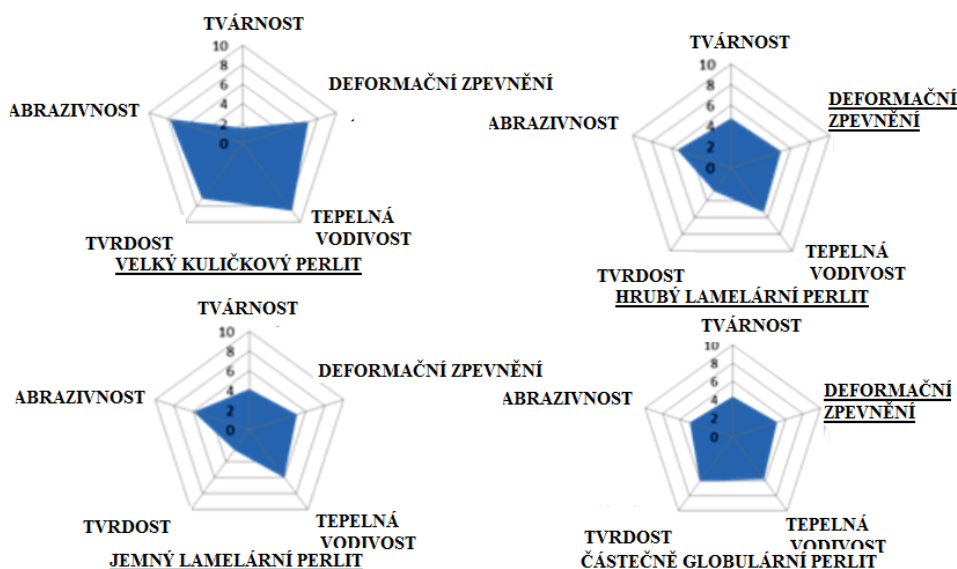
1.2.1 Vlastnosti materiálů vyjádřené pomocí polárních diagramů

Tyto diagramy popisují čistě materiálové vlastnosti, na jejichž základě je možné odhadnout jejich vliv na obrobitelnost. Mezi materiálové vlastnosti, které jsou podkladem pro tvorbu polárního diagramu, patří:

- a) tvrdost, odolnost proti deformaci
- b) náchylnost k opotřebení, adhezivnost, abrazivnost
- c) tvárnost
- d) velikost deformačního zpevnění
- e) tepelná vodivost

Na základě těchto parametrů (nejsou součástí řezného procesu) lze posoudit obrobitelnost materiálu obrobku i v případě, že nepočítáme s řezným materiálem a podmínkami obráběcího procesu. Vlastnost, jako např. náchylnost k opotřebení,

je velmi důležitá pro výběr řezného materiálu. Určení materiálových faktorů vyžaduje složitá měření, a není tedy snadným úkolem. Polární diagramy jsou užitečné pro pochopení rozdílů v obrobitelnosti. Na obrázku 5 je na ukázkou zobrazeno porovnání čtyř různých mikrostruktur cementované a rozdílně tepelně zpracované oceli (20MnCrS5) při zkoušce obrábění. [8], [12], [13]



Obr. 5: Příklady polárních diagramů pro klasifikaci obrobitelnosti materiálu z pohledu materiálových vlastností [13]

Z diagramu tedy vyplývá, že malý, tvárný lamelární perlit je lépe obrobitelný než velký kuličkový perlit, ale test nezahrnuje vliv tvaru a lámavosti třísky (tříška je u lépe obrobitelného dlouhá). Cementační oceli by při obrábění měly obsahovat stejné množství perlitu a feritu a velikost zrn by měla být v rozmezí $50 \div 100 \mu\text{m}$. [8], [12], [13]

1.3 Značení obrobitelnosti

Je-li obrobitelnost posuzována hodnotou v_T , jde prakticky o vyhodnocování úběru obráběného materiálu (velikost objemu materiálu odebraná za jednotku času) pomocí daného nástroje při dohodnutém konstantním průřezu třísky, v určitém řezném prostředí. Pro potřeby vyhodnocování obrobitelnosti jsou konstrukční materiály rozděleny do devíti základních skupin, které jsou označeny písmeny:

- a – litiny,

- b – oceli,
- c – těžké neželezné kovy (měď a slitiny mědi),
- d – lehké neželezné kovy (hliník a slitiny hliníku),
- e – plastické hmoty,
- f – přírodní nerostné hmoty,
- g – vrstvené hmoty,
- v – tvrzené litiny pro výrobu válců.

Každá z těchto skupin má svůj vybraný referenční materiál (tzv. etalon obrobiteľnosti), a k tomuto materiálu je vztahována relativní obrobiteľnost všech ostatních materiálů patřících do této skupiny. Před písmeno, určující skupinu obrobiteľnosti, je umísťováno číslo, které určuje, do které třídy obrobiteľnosti daný materiál náleží (značení pak vypadá např.: 10a; 15b; apod.). [4], [7], [15]

Mezi jednotlivými třídami obrobiteľnosti je vždy rozdíl daný geometrickou řadou s kvocientem $q = 1,26$ (viz vztah 5), kdy pro etalonový (referenční) materiál je kvocient roven 1. Z toho vyplývá, že hodnota řezné rychlosti $v_c T$ v příslušné třídě obrobiteľnosti je vždy 1,26 krát vyšší, resp. nižší, než hodnota řezné rychlosti v sousední třídě. [4], [7], [15]

$$q = \sqrt[10]{10} = 1,26 \quad (5)$$

Materiály patřící do tříd s nižším číslem než má referenční materiál, jsou hůře obrobitelné. Nejhorší relativní obrobiteľnost tedy vykazuje vždy materiál, spadající do nejnižší třídy obrobiteľnosti. Naopak nejlépe se obrábí materiál s číslem vyšším než referenční (etalonový) materiál. [4], [7], [15]

Rozdělení skupiny oceli na třídy, včetně hodnot K_v popisuje tabulka č. 1. Obrobiteľnost je především vlastností obráběného materiálu. Přesto však musí být posuzována v úzké souvislosti s řezivostí nástrojového materiálu, který je použit pro zkoušky obrobiteľnosti. [4], [7], [15]

Tabulka 1: Hodnoty Kv indexu obrobitelnosti pro jednotlivé třídy skupiny ocelí [7]

Třída	kvocient	střední hodnota	rozsah hodnot	Třída	kvocient	střední hodnota	rozsah hodnot
1b	$1,26^{-13}$	0,05	0,045÷0,054	11b	$1,26^{-3}$	0,05	0,45÷0,56
2b	$1,26^{-12}$	0,065	0,055÷0,069	12b	$1,26^{-2}$	0,63	0,57÷0,71
3b	$1,26^{-11}$	0,08	0,070÷0,089	13b	$1,26^{-1}$	0,8	0,72÷0,89
4b	$1,26^{-10}$	0,1	0,09÷0,11	14b	$1,26^0$	1	0,90÷1,12
5b	$1,26^{-9}$	0,13	0,12÷0,14	15b	$1,26^1$	1,26	1,13÷1,41
6b	$1,26^{-8}$	0,16	0,15÷0,17	16b	$1,26^2$	1,59	1,42÷1,78
7b	$1,26^{-7}$	0,2	0,18÷0,22	17b	$1,26^3$	2	1,79÷2,24
8b	$1,26^{-6}$	0,25	0,23÷0,28	18b	$1,26^4$	2,5	2,25÷2,82
9b	$1,26^{-5}$	0,32	0,29÷0,35	19b	$1,26^5$	3,15	2,83÷3,55
10b	$1,26^{-4}$	0,4	0,36÷0,44	20b	$1,26^6$	4	3,56÷4,47

Pro referenční materiály jsou hodnoty řezných rychlostí známy, takže pokud známe K_v zkoumaného materiálu, je snadné určit řeznou rychlost, při které bude u neznámého materiálu stejná trvanlivost břitu. Každá skupina materiálů má své referenční (etalonové) materiály. [7], [15]

Pro každou skupinu materiálů existuje referenční materiál. Pro skupinu a, která zahrnuje materiály s krátkou drobivou třískou (litiny), je referenčním materiálem šedá litina o tvrdosti 190 HB (třída 11a), dle ISO 185 (složení viz norma). Do skupiny b jsou řazeny oceli (nizkouhlíkové oceli) tvořící plynulou třísku a etalonem je materiál C45 E4 (dle ISO 638-1) s třídou obrobitelnosti 14b. Skupina c zahrnuje neželezné kovy, referenčním materiálem je automatová ocel (třída 12c). Skupina d se týká lehkých kovů – referenční materiál je dural s obrobitelností 12d. [4], [15]

Obrobitelnost je vlastností především obráběného materiálu, ale musí být posuzována spolu s řezivostí nástroje, použitého při zkoušce obrobitelnosti. Česká literatura uvádí vlastnosti a třídy obrobitelnosti pro zhruba 500 druhů ocelí (ČSN), k nimž přiřazuje 263 druhů ocelí dle DIN, tyto hodnoty jsou dále doplněny 137 druhy ocelí dle evropské normy EN. [7]

Třídy obrobitelnosti jsou značeny dle CNN ([4]) a současně jsou porovnány s třídami obrobitelnosti uváděnými v katalogu firmy WIDIA, která zahrnuje 92

druhů ocelí. Oceli, které nebyly nalezeny v katalogu WIDIA, jsou převedeny pomocí porovnávací tabulky. Podle CNN je pro oceli doporučován pouze jeden etalonový materiál (ocel **12 050.1**). V praxi by ale většinou bylo lepší používat pro každou třídu obrobitelnosti jiný referenční materiál. Doporučené materiály uvádí tabulka č. 2. [7]

Tabulka 2: Doporučené etalonové materiály pro danou třídu obrobitelnosti[7]

Třída obrobitelnosti	18b	17b	16b	15b	14b	13b	12b	11b	10b	9b
referenční materiál	12 010	11 373	12 040	14 220	12 050	12 050	12 060	12 060	12 061	15 330
tvrdost etalonu HB	105	130	160	160	190	250	250	280	280	350

Tabulka č. 3 zobrazuje doporučené etalonové (referenční) korozivzdorné austenitické oceli. Tabulka č. 4 porovnává obrobitelnosti oceli dle české státní normy s německou normou DIN (WIDIA).

Tabulka 3: Doporučené etalonové oceli [7]

Třída obrobitelnosti	12b	9b	8b	7b
referenční materiál	17 020	17 248	17 352	-

Tabulka 4: Porovnání obrobitelnosti dle ČSN a DIN [7]

OCELI										
ČSN	18b	17b	16b	15b	14b	13b	12b	11b	10b	9b
DIN (WIDIA)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
AUSTENITICKÉ OCELI										
ČSN	12b	11b	10b	9b	8b	7b				
DIN (WIDIA)	1	2	3	4	5	6				

Obrobitelnost dle DIN se zapisuje následujícím způsobem:

A 15 330 350 10 G, kde první písmeno značí:

A (1-10) – uhlíkové oceli, nízkolegované oceli a ocelolitina

B (11-18) – litiny

C (21-26) – vysocelegované oceli, nástrojové oceli a nerez

následuje označení materiálu (**15 330**), tvrdost (**190 HB**), třída obrobitelnosti (**10**), představitel (**G**).

1.4 Příklad výpočtu skupin obrobitelnosti dle CNN

Normativ rozděluje oceli do skupin na základě zkoušek bez chlazení, prováděných slinutými karbidy P10-P20. Výpočet skupin obrobitelnosti i jednotlivé vyhodnocovací tabulky, které jsou zpracovány v normativech, jsou odvozeny z provedených zkoušek a zkušeností se zařazením materiálů v předchozích normativech a výzkumných zpráv VUOSO Praha a ČVUT Praha – katedra obrábění. [4]

Tabulka 5: Ukázka tabulky pro stanovení koeficientu chem. složení ocelí [4]

Prvky [%]	C	Mn	Si	Ti	Cr	Ni	V	W	Mo	Co	Al	Prvky [%]	C	Mn	Si	Ti	Cr	Ni	V	W	Mo	Co	Al
	C	Mn	Si	Ti	Cr	Ni	V	W	Mo	Co	Al		C	Mn	Si	Ti	Cr	Ni	V	W	Mo	Co	Ta
											Ta												
											Nb												
											Cu												
Kchs1												Kchs1											
0,10	1,40	0,85	0,23	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,15	0,15	1,20	3,20	1,42	0,34	0,23	0,34	0,23	0,23	0,53	0,53	0,97	
0,12	1,30	0,82	0,26	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,12	0,17	0,17	1,30	3,40	1,50	0,36	0,24	0,36	0,24	0,24	0,56	0,56	1,03	
0,14	1,25	0,80	0,29	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,13	0,19	0,19	1,40	3,60	1,60	0,38	0,25	0,38	0,25	0,25	0,59	0,59	1,10	
0,16	1,18	0,78	0,32	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,14	0,21	0,21	1,50	3,78	1,70	0,40	0,26	0,40	0,26	0,26	0,62	0,62	1,15	
0,18	1,12	0,76	0,38	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,15	0,23	0,23	1,60	3,95	1,80	0,42	0,27	0,42	0,27	0,27	0,65	0,65	1,20	
0,20	1,08	0,74	0,4	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,16	0,25	0,25	1,70	4,13	1,88	0,44	0,28	0,44	0,28	0,28	0,68	0,68	1,25	
0,22	1,05	0,72	0,43	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10	0,17	0,27	0,27	1,80	4,30	1,96	0,46	0,29	0,46	0,29	0,29	0,70	0,70	1,30	
0,24	1,02	0,74	0,46	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10	0,19	0,29	0,29	1,90	4,45	2,03	0,47	0,30	0,47	0,30	0,30	0,72	0,72	1,35	
0,26	1,02	0,76	0,49	0,12	0,10	0,10	0,10	0,10	0,20	0,31	0,31	2,00	4,60	2,12	0,48	0,31	0,48	0,31	0,31	0,75	0,75	1,40	
0,28	1,07	0,78	0,52	0,12	0,10	0,10	0,10	0,10	0,21	0,32	0,32	2,10		2,20	0,50	0,31	0,50	0,31	0,31	0,77	0,77	1,45	
0,30	1,13	0,82	0,57	0,13	0,10	0,10	0,10	0,10	0,22	0,34	0,34	2,20		2,28	0,52	0,32	0,52	0,32	0,32	0,80	0,80	1,50	
0,35	1,26	0,88	0,62	0,14	0,11	0,10	0,10	0,10	0,24	0,38	0,38	2,30		2,36	0,53	0,33	0,53	0,33	0,33	0,82	0,82	1,55	
0,40	1,40	0,95	0,67	0,15	0,11	0,10	0,10	0,10	0,26	0,42	0,42	2,40		2,44	0,55	0,34	0,55	0,34	0,34	0,85	0,85	1,60	
0,45	1,53	1,05	0,74	0,16	0,12	0,10	0,10	0,10	0,28	0,46	0,46	2,50		2,50	0,56	0,35	0,56	0,35	0,35	0,87	0,87	1,65	
0,50	1,67	1,15	0,80	0,18	0,13	0,10	0,10	0,10	0,30	0,50	0,50	2,60		2,58	0,58	0,36	0,58	0,36	0,36	0,90	0,90	1,70	
0,60	1,87	1,30	0,86	0,21	0,15	0,10	0,10	0,10	0,33	0,57	0,57	2,70		2,66	0,60	0,37	0,60	0,37	0,37	0,92	0,92	1,75	
0,65	2,00	1,37	0,91	0,22	0,16	0,10	0,10	0,10	0,35	0,60	0,60	2,80		2,72	0,61	0,38	0,61	0,38	0,38	0,94	0,94	1,80	
0,70	2,15	1,45	0,97	0,23	0,17	0,10	0,10	0,10	0,37	0,64	0,64	2,90		2,80	0,62	0,39	0,62	0,39	0,39	0,96	0,96	1,85	
0,75	2,25	1,52	1,02	0,24	0,18	0,10	0,10	0,10	0,39	0,67	0,67	3,00		2,88	0,64	0,39	0,64	0,39	0,39	0,98	0,98	1,90	
0,80	2,35	1,60	1,07	0,25	0,19	0,10	0,10	0,10	0,40	0,70	0,70	3,10		2,95	0,65	0,40	0,65	0,40	0,40	1,00	1,00	1,95	
0,85	2,45	1,67	1,12	0,26	0,20	0,10	0,10	0,10	0,42	0,73	0,73	3,20		3,02	0,67	0,40	0,67	0,40	0,40	1,02	1,02	2,00	
0,90	2,57	1,75	1,17	0,27	0,21	0,10	0,10	0,10	0,44	0,76	0,76	3,30		3,10	0,68	0,41	0,68	0,41	0,41	1,04	1,04	2,05	
0,95	2,68	1,82	1,22	0,28	0,22	0,10	0,10	0,10	0,46	0,80	0,80	3,40		3,16	0,70	0,42	0,70	0,42	0,42	1,06	1,06	2,10	

České normy a další, např. EN a DIN, poskytují údaje o specifickém rozpětí jednotlivých prvků obsažených v materiálu. Konstanta Kchs 1 (konstanta chemického složení) je vyčíslena z maximálního obsahu prvků, jež příslušná materiálová norma udává. Kchs 1 se stanovuje z tabulek k tomu určených (tabulka č. 5). Tabulky jsou členěny podle druhu oceli. Na oceli konstrukční tvářené, oceli austenitické,

korozivzdorné, cementační a nitridované, nemagnetické apod. V případě, že hodnota vyjádřená v normě není shodná s údajem v tabulce, použije se nejbližší nižší hodnota a příslušná konstanta Kchs 1. Součet jednotlivých konstant Kchs 1 se použije pro výpočet skupiny obrobitelnosti jako konstanta Kchs 2. Síra, fosfor, měď a olovo jsou považovány za prvky se zlepšujícím vlivem na obrobitelnost, a proto jsou od konstanty Kchs 2 odečítány. [4]

Materiálové normy ČSN udávají rozsah mechanických vlastností jednotlivých ocelí v jednotkách tvrdosti či pevnosti. Konstanta Kmh je vyčíslována z maximální hodnoty tvrdosti, čili pevnosti konkrétního materiálu. V případě, že normy udávají jen hodnoty nejnižší nebo jen informativní hodnoty, používá se při vyhodnocování konstanty Kmh navýšení o tyto procentuální hodnoty:

- nekalené oceli + 20 %,
- kalené oceli do HRC 45, + 10 %
- kalené oceli do HRC 55, + 6 %
- kalené oceli do HRC 60, + 3 %
- kalené oceli přes HRC60 -
- těžké a lehké neželezné kovy a litiny + 25 %

Výše uvedená navýšení vycházejí z rozboru normy ČSN. Stejně jako konstanty chemického složení se i konstanta Kmh stanovuje z tabulek. Tabulky jsou děleny podle druhu oceli. V případě, že hodnota vyjádřená v normě není shodná s údajem v tabulce, použije se nejbližší nižší hodnota Kmh. [4]

- Příklad výpočtu skupiny obrobitelnosti pro materiál ČSN 41 109.0 o tvrdosti 218 HB, pevnosti 760 MPa, polotovár – tyč ϕ 15 mm, tažená za studena.

Tabulka 6: Příklad výpočtu třídy obrobitelnosti[4]

chem. Složení [max %]	Kchs 1	Kmh
C = 0,13	1,3	0,77
Mn = 1,5	2,5	
P = 0,1	-0,2	
S = 0,32	-0,42	
SUMA	3,18	0,77

Třída obrobiteľnosti pro obrábění se určí z tabulek normativů:

$3,18 \cdot 0,77 = 2,45 \rightarrow$ třída obrobiteľnosti 15b, kde hodnota 2,45 slouží k volbě třídy obrobiteľnosti z tabulek uvedených v normativu.[4]

1.5 Zkoušky obrobiteľnosti

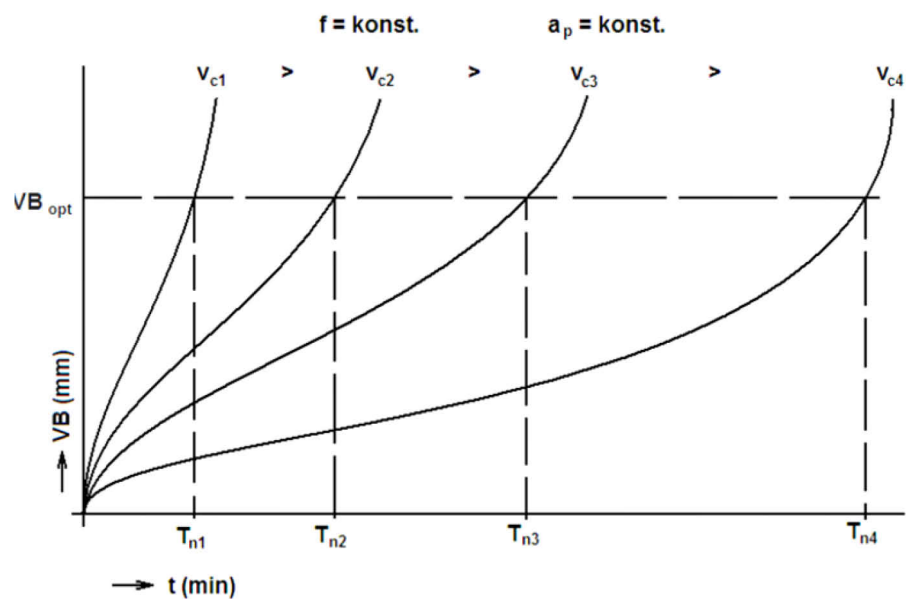
Stupeň obrobiteľnosti daného materiálu bývá různý pro každou technologii obrábění (soustružení, frézování, vrtání, broušení...) Proto je nutné zkoušky obrobiteľnosti provádět pro jednotlivé metody obrábění zvlášť. Zkoušení obrobiteľnosti materiálů z hlediska času je možné rozdělit na dvě skupiny: zkoušky krátkodobé a zkoušky obrobiteľnosti dlouhodobé. Dále se dají rozdělit na metody přímé a nepřímé. U metod přímých se bezprostředně stanoví hodnota řezné rychlosti pro zvolenou trvanlivost. [1], [7], [19]

1.5.1 Dlouhodobé zkoušky obrobiteľnosti

U dlouhodobé zkoušky je kritériem hodnota řezné rychlosti a provádí se soustružením nebo frézováním dohodnutými konstantními řeznými parametry, druhem řezného nástroje, v daném řezném prostředí více odstupňovanými řeznými rychlostmi až do optimálního opotřebení břitu (smluvená hodnota, daná normou). Tato zkouška je považována za základní a podle ní se posuzuje míra objektivit ostatních zkoušek obrobiteľnosti. Tuto zkoušku lze také využít k určování řezivosti obráběcích nástrojů. Nevýhodou této zkoušky je velká spotřeba obráběného materiálu a vysoká časová náročnost zkoušky. Proto je z výše uvedeného hlediska dlouhodobá zkouška obrobiteľnosti nevýhodná.

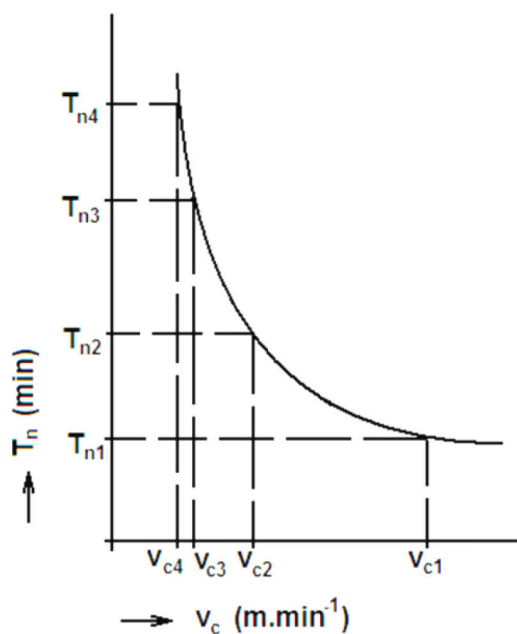
- **Průběh dlouhodobé zkoušky trvanlivosti [7]:**

1/ změří se časový průběh opotřebení na hřbetu nástroje VB_B pro několik hodnot řezných rychlostí při konstantních řezných parametrech a sestrojí se křivky otupení (viz obrázek č. 6). Hodnoty řezných rychlostí a řezných parametrů udává norma ISO 3685, která popisuje zkoušku trvanlivosti soustružnických nástrojů s jednou řeznou hranou.



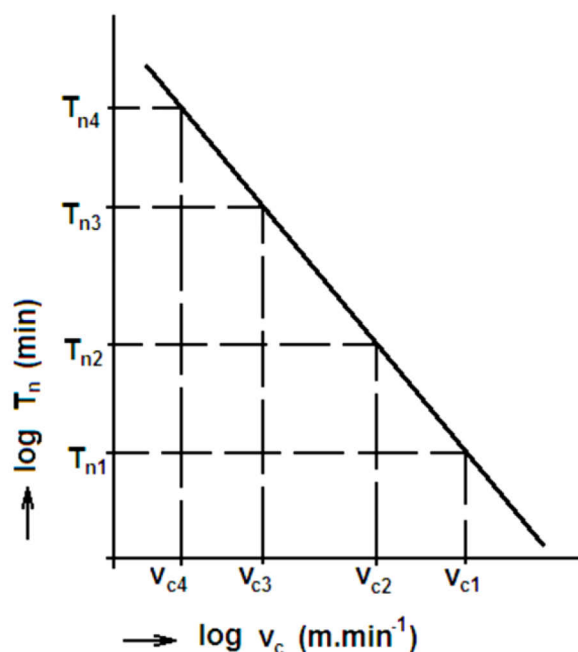
Obr. 6: Křivky opotřebení pro čtyři různé řezné rychlosti [7]

2/ Určí se kritérium opotřebení VB_{opt} , a tím se stanoví pro každou řeznou rychlost odpovídající trvanlivost břitu (obrázek č. 7),



Obr. 7: Určení trvanlivostí na základě zvoleného kritéria opotřebení [7]

3/ Sestrojí se závislost $T_n = f(v_c)$ v logaritmických souřadnicích a pro vybranou optimální trvanlivost se stanoví index obrobitelnosti, při srovnání řezné rychlosti zkoumaného materiálu s řeznou rychlostí materiálu referenčního (etalonového). Viz. obrázek č. 8.



Obr. 8: Závislost trvanlivosti břítu na řezné rychlosti v logaritmických souřadnicích[7]

Trvanlivost nástroje popsal již ve 20. století F. W. Taylor, kdy zjistil, že ze všech řezných podmínek má na trvanlivost řezných nástrojů největší vliv řezná rychlost. Na základě těchto poznatků odvodil vztah pro vzájemnou závislost ($T - v_c$) – známý jako „Taylorův vztah“, který se užívá ve tvaru (5). Z těchto závislostí vychází i norma ISO 3685.

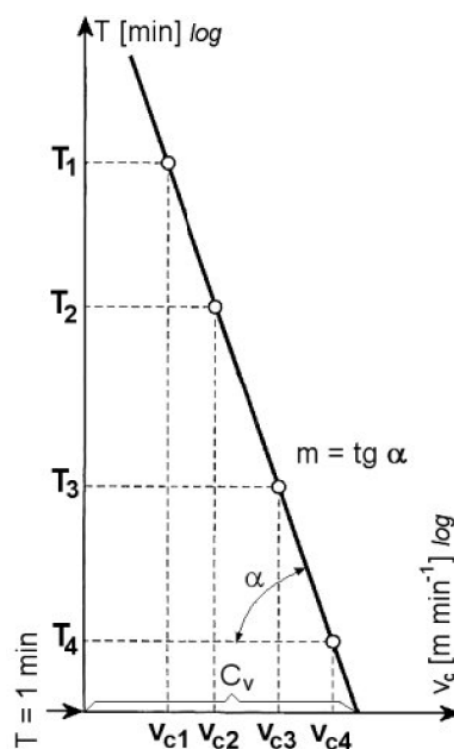
$$T = \frac{C_T}{v_c^m} [\text{min}] \quad (5)$$

Kde: C_T - konstanta; v_c - řezná rychlost; m – exponent (míra závislosti řezné rychlosti na trvanlivosti)

Vzhledem k vysoké konstantě C_T (přibližně $10^9 \div 10^{13}$) se častěji užívá ve tvaru (6).

$$v_c = \frac{C_V}{T^{1/m}} [m \cdot \text{min}^{-1}] \quad (6)$$

Kde $C_V = C_T^{1/m}$; velikost konstanty C_V je menší (řádově $10^2 \div 10^3$) než C_T . Exponent m vyjadřuje směrnici vytvořené přímkou ($m = \text{tg} \alpha$) viz obrázek č. 9.



Obr. 9: Zlogaritmovaný T- v_c diagram

Nevýhodou u zkoušek trvanlivosti je právě omezení hloubkou záběru, velikostí posuvu a šířkou opotřebení VB, kdy jsou tyto parametry konstantní. Proto existují ještě rozšířené vztahy, ale jejich nevýhodou je ještě delší časová náročnost.

1.5.2 Krátkodobé zkoušky obrobiteľnosti

Tyto zkoušky jsou méně objektivní v porovnání se zkouškami dlouhodobými, ale mají výhodu v nesrovnatelně kratší době trvání a hlavně v nižší spotřebě obráběného (testovaného) materiálu. Tyto krátkodobé zkoušky obrobiteľnosti jsou v praxi žádoucí hned z několika důvodů. Díky neustálému vývoji nových konstrukčních i řezných materiálů, které je potřeba testovat ve vzájemných kombinacích, dávají krátkodobé zkoušky relativně přesné a postačující výsledky. [7]

Krátkodobé zkoušky obrobiteľnosti se hodí k rychlému rozřídění skupiny materiálu podle třídy obrobiteľnosti, nebo pro ověření případné změny stupně obrobiteľnosti u jednotlivých taveb stejného druhu materiálu, nebo pro rychlé určení relativního stupně obrobiteľnosti z jednotlivých taveb a u nově vyvíjených materiálů. [7]

Podle principu a podle použitého kritéria je možné zkušební metody dále rozdělit na přímé a nepřímé. Metody založené na přímém zjišťování intenzity opotřebení za zotřených či jinak smluvně upravených podmínek. Nepřímé metody vycházejí ze známého, resp. předpokládaného vztahu mezi opotřebením břitů a charakteristickými parametry řezného procesu. Jsou založeny převážně na zjišťování energetických parametrů. [7]

Metody pro zjišťování obrobiteľnosti přímé [7]:

- čelní krátkodobá zkouška,
- mikrozkouška trvanlivosti,
- snížení míry opotřebení,
- použití nástroje se sníženou řezivostí,
- zvýšení řezné rychlosti.

Metody pro zjišťování obrobiteľnosti nepřímé [7]:

- dynamická metoda (měření sil při obrábění),
- pomocí teploty řezání,
- mikrometrická metoda (při stejné hodnotě drsnosti),
- Leyensetterova metoda,
- porovnání tvaru třísky,
- vrtání při konstantním tlaku,
- měření tvrdosti obrobku,
- měření hloubky zpevněné vrstvy.

Efektivní metoda krátkodobého určení obrobiteľnosti [7]:

Jednou z možností určení obrobiteľnosti materiálu je např. metoda měření teploty řezání pomocí pyrometru, zobrazená na obrázku 10, jedná se o metodu bezdotykovou.



Obr. 10: Měření teploty řezání pomocí pyrometru

Další velmi efektivní a přesná, ekonomicky výhodná a nenáročná na čas, je zkouška založená na zkoumání závislosti síly řezání a jejich složek F_c , F_f , F_p , při soustružení (popř. frézování...) na řezné rychlosti v_c . Princip takovéto krátkodobé zkoušky obrobiteľnosti je v teoreticky dokázané a experimenty potvrzené skutečnosti, že materiál z hlediska obrobiteľnosti houževnatější, vykazuje při obrábění vyšší měrný řezný odpor než materiál méně houževnatý, při stejných řezných podmínkách. [7]

1.6 Řezné materiály a jejich poškození

Pro vypracování praktické části této diplomové práce bylo nezbytně nutné studium základních typů poškození řezných nástrojů a především možnosti jejich měření v praxi.

Typy opotřebení, kterým podléhá řezný nástroj v průběhu obrábění, závisí na rychlosti, za níž opotřebení proběhne. Tato fakta mají zásadní vliv na výrobní rychlost a samozřejmě na finanční náklady spojené s řezným materiálem. Způsob a typ opotřebení závisí na řezných podmínkách, způsobu obrábění, obráběném materiálu. Opotřebení probíhá na plochách řezného nástroje, který je ve styku s obráběnou součástí. Opotřebení nástroje může mít různý charakter, jako např. tvorba lomů, trhlin, nebo opotřebení způsobené díky chemickým procesům (difuze apod.). Chemické, tepelné a mechanické zatížení řezného nástroje jsou hlavními faktory, způsobujícími opotřebení.

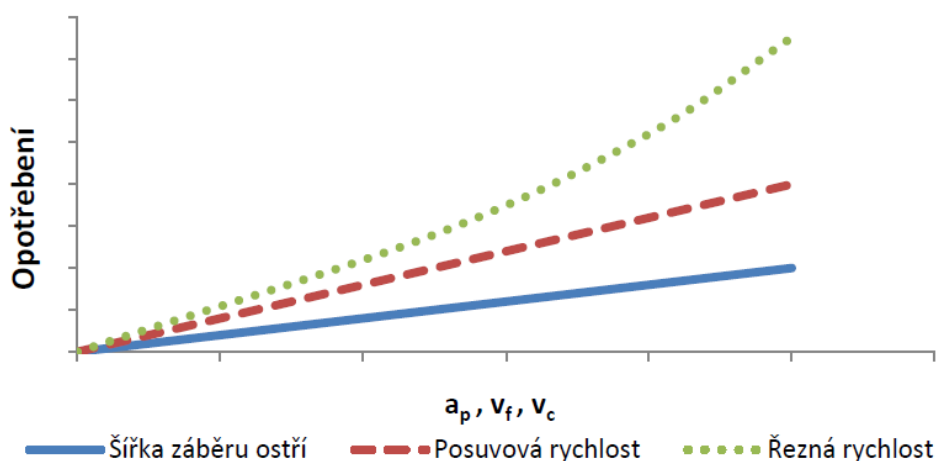
Řezný nástroj a jeho materiál může mít různou pevnost, houževnatost, mikrostrukturu, nanesený povlak (různé vlastnosti). Tyto vlastnosti charakterizují použití řezného materiálu pro různé aplikace. V současnosti jsou na řezné materiály kladeny vysoké požadavky a je snahou mít materiál, který má vysokou houževnatost a zároveň tvrdost. Ke zmenšení takového rozdílu mezi tvrdostí a houževnatostí pomáhají především povlaky, které jsou nanášeny na řezné materiály (houževnatější substrát a tvrdý, méně houževnatý povlak).

Není však v možnostech této práce popisovat složení a způsoby výroby jednotlivých řezných materiálů a jejich vlastnosti.

1.6.1 Hlavní faktory ovlivňující opotřebení nástrojů

Faktory ovlivňující opotřebení břitu řezného nástroje je možné rozdělit z několika pohledů; buď z pohledu obráběného materiálu, nebo z pohledu řezných podmínek, řezného prostředí. Nejvýznamnější faktory, které ovlivňují opotřebení břitu, z pohledu řezných podmínek, jsou řezná rychlost, posuvová rychlost a hloubka záběru. Vliv řezných podmínek na opotřebení je zobrazen na obrázku č. 11.

- **Řezná rychlost v_c :** Se zvyšováním řezné rychlosti stoupá také rychlost opotřebení nástroje. Řezná rychlost patří mezi faktory, které nejvíce ovlivňují opotřebení břitu řezného nástroje. [20]
- **Rychlost posuvu v_f :** Rychlost posuvu má na opotřebení řezného nástroje o něco menší vliv než řezná rychlost. Logicky má rychlost posuvu větší vliv na opotřebení hřbetní plochy nástroje, z důvodu většího „zatlačování“ materiálu do obrobku. [20]
- **Hloubka záběru a_p :** S rostoucí hloubkou záběru se zvětšuje plocha třísky a délka opotřebení na hřbetu nástroje, která má vliv na řezné síly. Hloubka záběru má na opotřebení nejmenší vliv. [20]

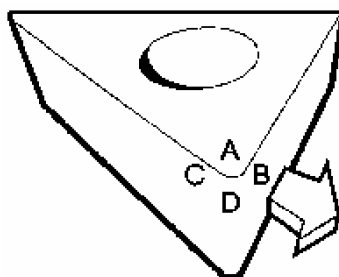


Obr. 11: Vliv řezných podmínek na velikost opotřebení [20]

Mezi další faktory, které ovlivňují opotřebení břitu nástroje, patří např.: druh a vlastnosti obrobku a řezného materiálu, teplota řezání, typ řezného prostředí, řezná geometrie.

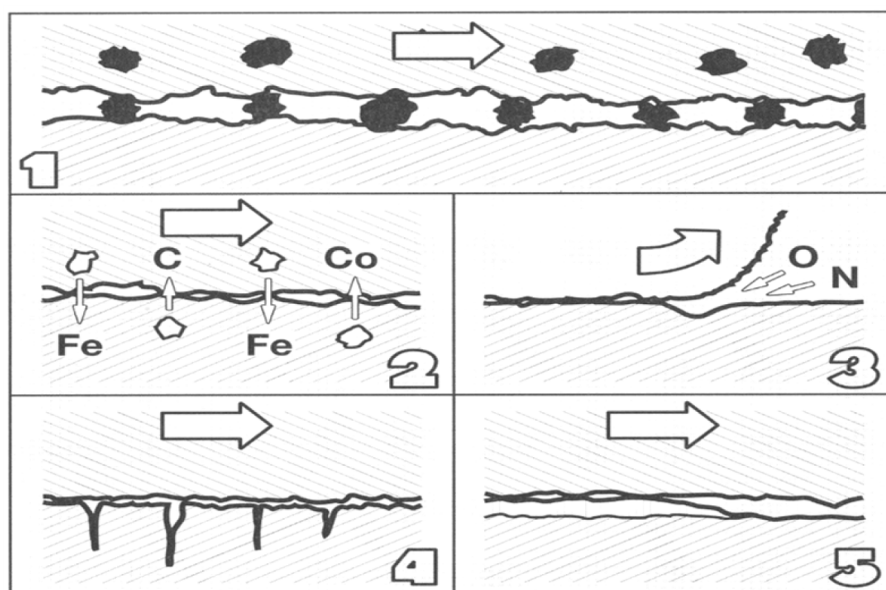
1.6.2 Mechanismy opotřebení nástrojů

Při obráběcím procesu dochází k velké tvorbě tepla, které se vyvíjí na ploše čela a hřbetu nástroje. Tepelná zatížení značně namáhají materiál břitu nástroje. Procesem utváření třísky se plynule vytváří při vysokém tlaku a teplotách čistý kovový povrch, který má sklony k chemickým reakcím a k difuzním procesům. Většina obráběných materiálů obsahuje určité množství tvrdých částic (vměstků, karbidů), které se svými vlastnostmi (tvrdostí a pevností) téměř neliší od materiálu břitu řezného nástroje. Tyto částice způsobují na nástroji brousící, abrazivní efekt. Kombinací tepelných, chemických a mechanických či abrazivních vlivů dochází ke složitému zatěžování břitu řezného nástroje. Tato fakta vedou k opotřebení, které vzniká na čele - A, hlavním hřbetu - B, vedlejším hřbetu - C, poloměru špičky - D (viz obrázek č. 12). [21]



Obr. 12: Oblasti opotřebení na VBD [24]

K základním mechanismům opotřebení, zjištěným na základě analýzy výše zmíněných faktorů, patří: opotřebení abrazivní, difuzní, oxidační a adhezní ořez (viz obrázek č. 13) – jejich popis je na další stránce. [21]



Obr. 13: Hlavní mechanismy opotřebení břitů [25]

I. ABRAZIVNÍ OPOTŘEBENÍ:

Abrazivní opotřebení vzniká hlavně působením tvrdých částic, obsažených v materiálu obráběné součásti. Tyto částice se dostávají mezi povrch obrobku a řezného nástroje. Schopnost břitů odolávat tomuto způsobu opotřebení závisí na jeho tvrdosti. Tvrdý nástroj však může podléhat jiným formám opotřebení, viz níže. [22]

II. DIFUZNÍ OPOTŘEBENÍ:

Tento typ opotřebení vzniká díky chemickým vlivům, reakcím při obrábění. Velikost difuzního opotřebení závisí na chemickém složení a afinitě obráběného materiálu k materiálu řezného nástroje. Toto opotřebení souvisí s teplotou a nejčastěji se projevuje u nástrojových materiálů vyrobených z diamantu (afinita k uhlíku). [22]

III. OXIDAČNÍ OPOTŘEBENÍ

U tohoto typu opotřebení opět hraje roli teplota, která způsobuje spolu s kyslíkem ze vzduchu oxidaci většiny kovů. Např. wolfram s kobaltem tvoří porézní filmy oxidu, které jsou odváděny třískou. Vzduch má přístup do řezného procesu v místě kontaktu břitů, kde končí tříska. Působením oxidace vznikají typické žlábkové. [22]

IV. LOMOVÉ OPOTŘEBENÍ

Lom má velmi často termomechanické příčiny. Střídání teplot spojené např. s rázovým zatížením (přerušovaný řez) vede k vydrolování a následnému lomu nástroje. K lomu dochází většinou z důvodu velké tvrdosti řezného materiálu, nebo vlivem vysoké tvrdosti obráběného materiálu.

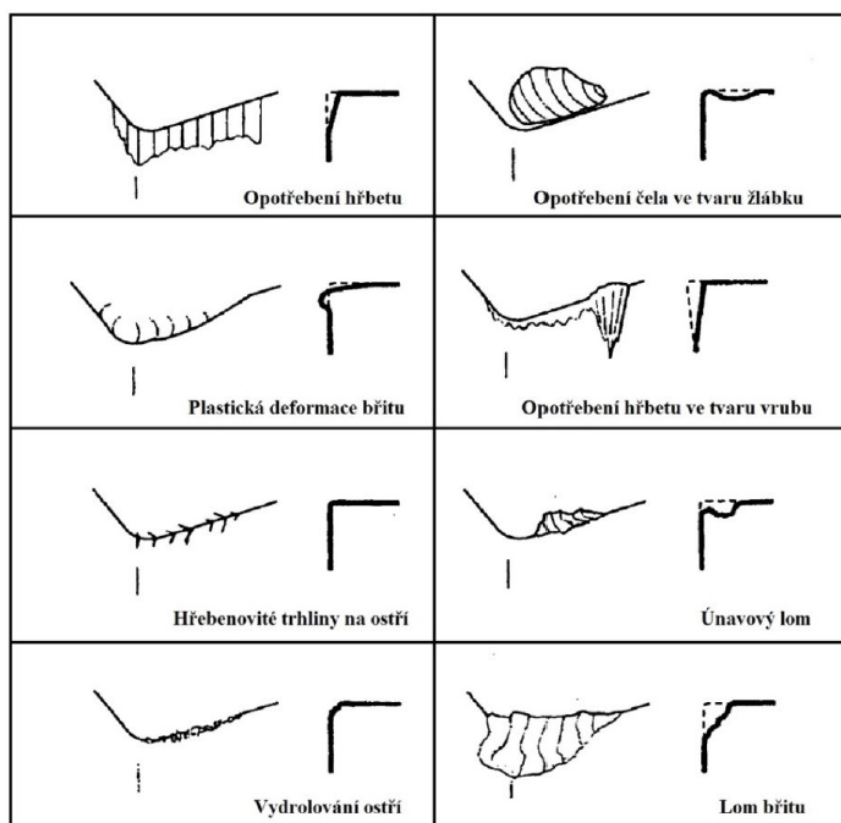
V. ADHEZNÍ OPOTŘEBENÍ

Vyskytuje se hlavně na čele nástroje, většinou za nízkých teplot. Tento typ opotřebení vzniká u materiálů tvořících dlouhou i krátkou třísku a způsobuje tvorbu nárůstků mezi břitem a třískou (dochází k navařování a vytvrzování vrstev z třísky). Nárůstky se mohou zvětšovat a poškodit tak břit odlomením či vydrolováním. Dochází i ke změně řezné geometrie, a tím i ke změnám rozměrů obráběné součásti. [22], [3]

- **Klasifikace jednotlivých typů opotřebení:**

Klasifikace typů opotřebení nástrojů vychází z rozdělení do devíti základních skupin od firmy Sandvik Coromant. Tato firma provedla klasifikaci z důvodu ovlivnění produktivity obrábění, dobré volby řezných materiálů a parametrů řezání. Vychází z kritérií přesnosti rozměrů dosahovaných obráběním, jakosti obrobené plochy a z kontrolovaného odchodu třísky z místa řezu.

Typy opotřebení a jejich velikost je možné pozorovat a posuzovat při zvětšení pod mikroskopem. Toto umožňuje kontrolovat trvanlivost řezných nástrojů a vyvodit tak opatření, vedoucí k prodloužení životnosti nástrojů. Klasifikace typů opotřebení je na obrázku č. 14. [3], [22]



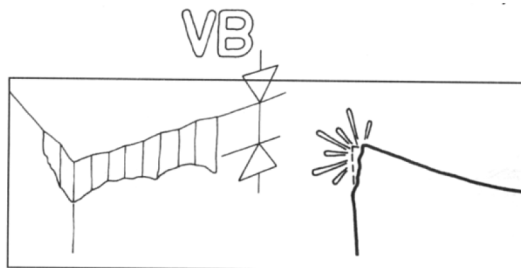
Obr. 14: Klasifikace typů opotřebení [3]

A. OPOTŘEBENÍ HŘBETU BŘITU:

Patří mezi abrazivní formy opotřebení a projevuje se na hřbetní ploše břitu (obrázek č. 15). Plochy hřbetu u hlavního ostří, vedlejšího ostří, poloměru špičky a na čelní

fasetce jsou před utvářením, během utváření a po utváření třísky zvlášť vystaveny působení materiálu obrobku.

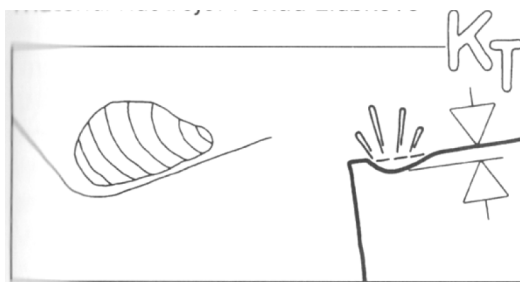
Opotřebení hřbetu je všeobecně obvyklým typem opotřebení. Stejněměrně se zvětšující opotřebení hřbetu je často považováno za ideální. Příliš velké opotřebení hřbetu má za následek zhoršení jakosti obrobeného povrchu, nepřesnost rozměrů a narůstání tření, které vzniká změnou geometrie břitu (zmenšení úhlu hřbetu). [3], [22]



Obr. 15: Opotřebení na hřbetu břitu [3]

B. OPOTŘEBENÍ VE TVARU ŽLÁBKU NA ČELE:

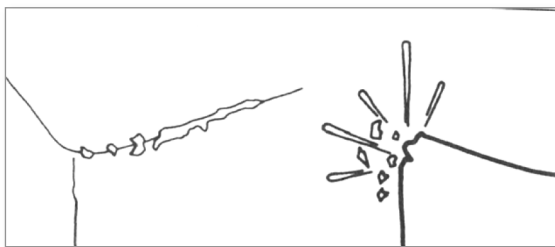
Je důsledkem působení mechanismů difúzního opotřebení a abraze. Žlábek vzniká částečně úběrem řezného materiálu nástroje vyvolaného brousícím pochodem, které vzniká působením tvrdých částic obsažených v materiálu, ale zejména difúzí v místě břitu s nejvyšší teplotou, tzn. v kontaktním místě mezi třískou a materiálem břitu. Tvrdost za tepla a malá afinita mezi materiály obrobku a břitu nástroje snižují tendenci ke vzniku tohoto opotřebení. Mimořádně velké opotřebení v podobě žlábku může změnit geometrii břitu, a ovlivnit tak tvar třísky, změnit směr působení řezných sil a zeslabit břit. [3], [22]



Obr. 16: Žlábek na čele nástroje [3]

C. VYDROLENÍ OSTŘÍ:

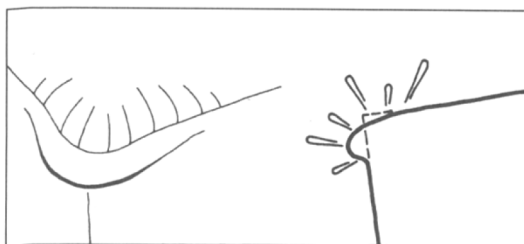
Je formou opotřebení, kdy se břit místo stejnoměrného opotřebení vydroluje. Opotřebení způsobené rázovým zatížením má za následek, že se drobné částičky řezného nástrojového materiálu začnou oddělovat z povrchu břitu. Nejčastější příčinou tohoto typu opotřebení je obrábění přerušovaným řezem. Průběžné sledování břitu ukáže, kde je možné očekávat vydrolování (obrázek č. 17). Odlupování materiálu a trhliny jsou příznaky, které upozorňují na možnost lomu břitu. Dalšími faktory způsobujícími tento typ opotřebení mohou být nevhodná volba řezného materiálu, nebo nevhodná volba ostří. [3], [22]



Obr. 17: Vydrolování ostří nástroje [3]

D. PLASTICKÁ DEFORMACE BŘITU:

Plastická deformace břitu vzniká působením kombinace vysokých teplot a řezných tlaků na břit nástroje (obrázek č. 18). U řezného materiálu, který těmto zatížením odolává a plasticky se nedeformuje, je tvrdost za tepla rozhodujícím faktorem. Typická deformace (vyboulení) břitu ještě více zvyšuje teploty a vede ke změně geometrie břitu, změně v dobrém odchodu třísek a může velmi rychle dosáhnout kritického stádia. Toto opotřebení lze zmenšit nebo odstranit za použití vhodného řezného materiálu, který vykazuje vyšší oteřuvzdornost, a má správné zaoblení ostří a vhodnou geometrii. [3], [22]



Obr. 18: Plastická deformace břitu nástroje [3]

E. OPOTŘEBENÍ VE TVARU VRUBU NA HŘBETĚ BŘITU:

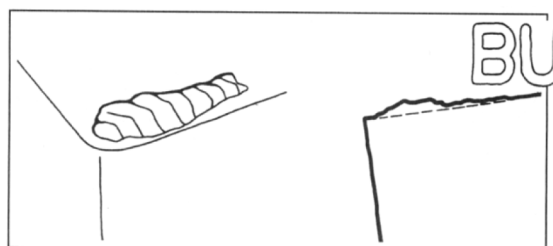
Tento typ opotřebení patří k typickým adhezním opotřebením. Může však stejně dobře souviset i s jevem oxidačního opotřebení. Vruby na hřbetě vznikají v místě kontaktu břitu s bokem. Toto opotřebení se objevuje přesně v místě, kudy proniká vzduch do řezného procesu. Opotřebení ve tvaru vrubu na vedlejším hřbetu břitu je zapříčiněno mechanickými vlivy. Za jejich vznik mohou tvrdé částice materiálu obrobku. Mimořádně velké opotřebení ve tvaru vrubu také ovlivňuje utváření třísky, a tudíž může vést k lomu destičky. [3], [22]



Obr. 19: Tvorba vrubu na břitu nástroje [3]

F. TVORBA NÁRŮSTKU:

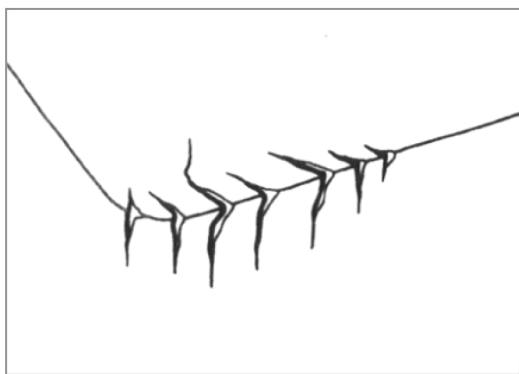
Tvorba nárůstku je v převážné většině případů fenoménem, který se vztahuje k teplotám a řezným rychlostem. Může však být způsobena i odlupováním vrstev v místě břitu, nebo jinými formami opotřebení. Mimo změny geometrie břitu působí tato forma opotřebení negativně, protože se mohou částice materiálu odlomit (viz obrázek č. 20). Afinita břitu k materiálu hraje v tomto případě rozhodující roli. Nízké teploty a vysoké tlaky vyvolávají mezi materiálem třísky a čelem nástroje efekt svařování. Velká část moderních způsobů obrábění probíhá nad oblastí tvorby nárůstků a mnohé moderní řezné materiály nemají při správném použití k této formě opotřebení sklony. Prvním negativním důsledkem tvorby nárůstku je zhoršená jakost obrobeného povrchu. Nadměrná tvorba nárůstků může vést až k lomu VBD. [3], [22]



Obr. 20: Opotřebení – tvorba nárůstku [3]

G. VZNIK HŘEBENOVÝCH TRHLINEK NA OSTŘÍ NÁSTROJE:

Vznik hřebenových trhlinek je formou únavového opotřebení, vznikajícímu díky tepelným šokům. Zvláště změna teplot při frézování často vede k tomuto druhu opotřebení. Trhlinky se tvoří kolmo na ostří, a přitom se mohou částice řezného materiálu mezi jednotlivými trhlinkami vylamovat, a vyvolat tak náhlý lom břitu (viz obrázek č. 21). Změnou tloušťky třísky se při obrábění změní rovněž teploty. Použití procesních kapalin se nedoporučuje, kvůli vysokým teplotním rozdílům při obráběcím procesu. [3], [22]



Obr. 21: Hřebenové trhlinky na ostří nástroje [3]

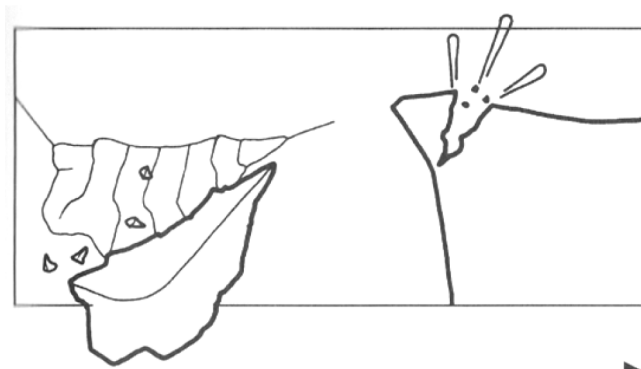
H. ÚNAVOVÝ LOM:

Únavový lom je typickým následkem obzvláště velkých změn velikosti řezných sil. Únavový lom vzniká vlivem součtu stále se měnících různých forem zatížení, kdy působení jednotlivých zatížení není dostatečně intenzivní, aby mělo za následek lom. Způsob vřezávání nástroje do materiálu obrobku, změna velikosti a směru působení řezné síly mohou být pro pevnost a houževnatost břitové destičky příliš náročné. Lomové plochy potom probíhají paralelně s ostřím nástroje. [3], [22]

I. VYLOMENÍ BŘITU NÁSTROJE:

Vylomení břitu je konečným selháním každého břitu řezného nástroje. Totální lom je často velmi nebezpečný, mělo by se mu za každých okolností, pokud možno, zabránit. Lom břitu nástroje (viz obrázek č. 22) je nutné v každém případě považovat

za konec trvanlivosti. Změny geometrie, oslabení břitu, nárůst teplot a sil mohou vést ke značným škodám. Křehký lom může být způsoben různými faktory. Ve většině případů je zvolený materiál břitu nástroje málo houževnatý na to, aby mohl zvládnout všechny požadavky kladené na správné obrábění. [3], [22]

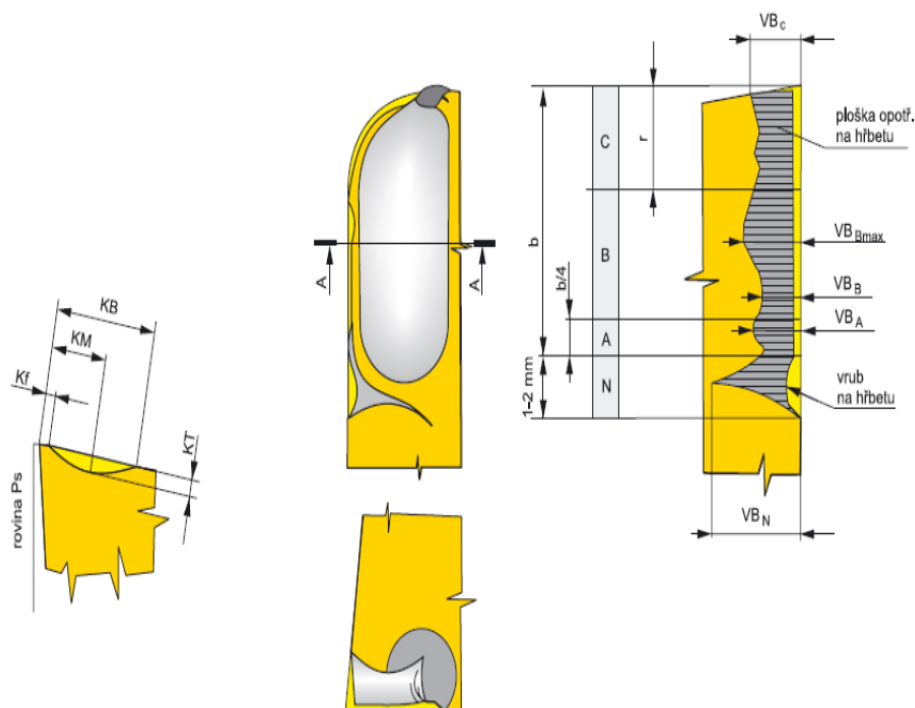


Obr. 22: Vylomení břitu nástroje [3]

Výše uvedené formy opotřebení patří mezi základní. Je nutné se jich, pokud možno, vyvarovat, a zajistit tak dobrou trvanlivost nástroje. Správné pochopení a dobrá analýza typů opotřebení, jejich mechanismů mohou vést ke správně zvolenému řeznému materiálu (řezným podmínkám, řezné geometrii apod.).

Opotřebení břitu řezného nástroje lze určit různými způsoby. Diplomová práce je založena na měření a určování opotřebení dle normy [19] ISO 3685: 1993 *Tool Life Testing with Single Point Turning Tools*. 1993. Tato norma uvádí určité formy opotřebení s jednotlivými charakteristikami a popisuje způsob, jak opotřebení měřit.

Na obrázku č. 23 jsou uvedena kritéria opotřebení dle citované normy. Nejvýznamnějším a nejpoužívanějším kritériem je opotřebení nástroje na hřbetu břitu, protože má velký vliv na povrch obrobku. Hloubka žlábků na čelní ploše výrazným způsobem snižuje pevnost celého nástroje a opotřebení špičky řezného nástroje má rozhodující vliv na rozměry obráběné součásti.



Obr. 23: Kritéria opotřebení dle ISO 3685: 1993 [19]

Tabulka 7: Popis k obrázku č. 22

LEGENDA			
VB	opotřebení hřbetu	VB_{Bmax}	maximální opotřebení
VB_c	opotřebení v oblasti špičky	KF	vzdálenost žlábků od čela
VB_N	vrubové opotřebení	KM	střední vzdálenost žlábků
VB_B	průměrné opotřebení přímé části ostří	KB	šířka žlábků

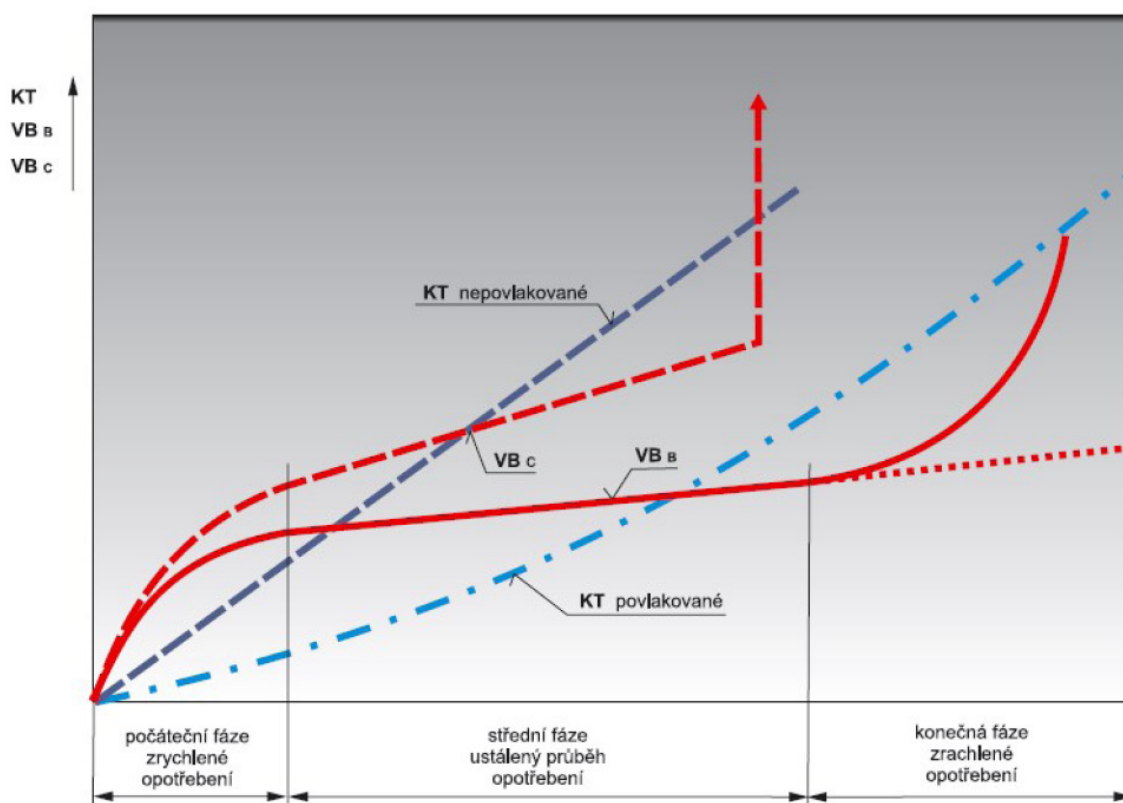
Pro měření opotřebení řezného nástroje je hlavní ostří rozděleno do čtyř oblastí, zobrazených na obrázku č. 23.

Oblast C je poloměrem ostří nástroje, oblast B je přímá část ostří mezi oblastí C a oblastí A. Oblast A je čtvrtina délky opotřebení nejvíce vzdálená od poloměru špičky nástroje. Oblast N leží mimo kontakt nástroje a obrobku, která je přibližně $1 \div 2$ mm za hlavním ostřím nástroje. Na novém nebo přestřeleném nástroji tak dochází k jeho postupnému opotřebování; viz praktická část práce. [21]

1.6.3 Časový průběh opotřebení

Jakýkoliv nový nebo jen přestřeny řezný nástroj, který se účastní řezného procesu, podléhá během své práce postupnému opotřebení. Jakým způsobem, jakou rychlostí a formou se nástroj bude opotřebovávat, je popsáno v předešlých kapitolách.

Zkonstruování diagramu (tzv. průběhové mapy) opotřebení ploch je složitý proces, a proto se opotřebení břitu řezného nástroje uvádí nejčastěji ve tvaru závislosti $VB = f(t)$, nebo ve tvaru $KT = f(t)$, kde t je čas řezného procesu. Tento diagram je znázorněn na obrázku č. 24. [26]



Obr. 24: Diagram časové závislosti opotřebení na hřbetu a čele [26]

Tento charakteristický průběh lze definovat:

a/ Oblastí zrychleného opotřebení (fáze záběhu)

Opotřebení v této fázi je způsobeno vysokým měrným tlakem na vrcholcích mikronerovností povrchu hřbetu a určitou defektností povrchové vrstvy, vyvolanou mikrotrhlinkami (následek broušení nebo slinování). [14]

b/ Oblastí s lineárním opotřebením s konstantní intenzitou

V této fázi je průběh opotřebení lineární a intenzita opotřebení je konstantní.

c/ Oblastí nadměrného (zrychleného opotřebení)

V počátcích přechodu do této oblasti hraje velkou roli intenzivní limitní teplota řezání a již dochází k poklesu tvrdosti řezného materiálu. Důsledkem je právě zrychlení opotřebení (někdy též tzv. „lavinové“ opotřebení). [14]

2. Teoretický rozbor experimentu

Na základě teoretických znalostí problematiky týkajících se obrobitelnosti, řezivosti a trvanlivosti, uvedených v kapitole 1, byl proveden experiment, jehož výsledkem je určení obrobitelnosti nespécifikovaného materiálu. V úvodu této kapitoly je popsáno použité strojní vybavení, nástroje a pomůcky nezbytné k provedení testů obrobitelnosti. Další část této kapitoly se věnuje popisu postupu při experimentu. Navazující kapitola se zabývá zpracováním a vyhodnocením naměřených dat.

2.1 Popis pomůcek použitých k provedení experimentu

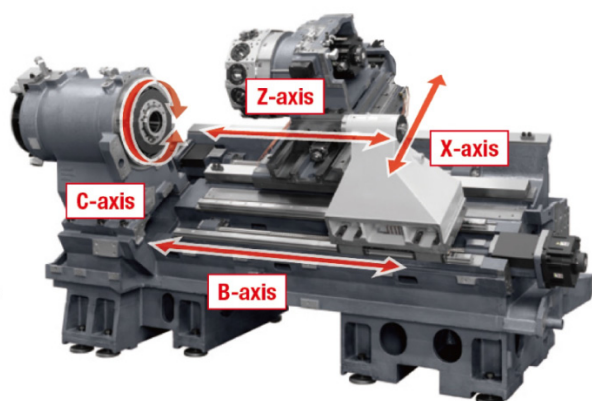
2.1.1 Použitý stroj

Celý experiment byl proveden na CNC soustružnicko-frézovacím centru značky DMG MORI NLX 2500/700 (obrázek č. 25), který nově vlastní Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava. Soustruh se nachází v laboratoři VŠB - TUO.

Tento moderní stroj vyniká především svou velkou tuhostí a přesností. Základní informace o použitém stroji jsou uvedeny v tabulce č. 8. Stroj byl vybaven pro experiment navíc přístrojem pro měření sil zn. Kistler.

Tabulka 8: DMG MORI NLX 2500MC/700 - základní technické parametry

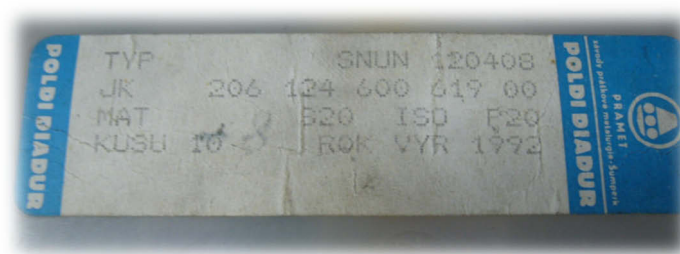
parametr	hodnota
<i>oběžný průměr nad ložem</i>	<i>787 mm</i>
<i>oběžný průměr nad suportem</i>	<i>541 mm</i>
<i>točná délka</i>	<i>705 mm</i>
<i>maximální průměr soustružení</i>	<i>366 mm</i>
<i>vrtání vřetene</i>	<i>80 mm</i>
<i>rozjezd – osa X</i>	<i>260 mm</i>
<i>rozjezd – osa Z</i>	<i>795 mm</i>
<i>max. otáčky vřetena</i>	<i>4 000 mm⁻¹</i>
<i>výkon vřetena stroje</i>	<i>18,5/18,5/15 kW</i>
<i>počet poloh nástrojů</i>	<i>12</i>
<i>velikost nástroje</i>	<i>max 25 x 25 mm</i>
<i>max. otáčky rotačních nástrojů</i>	<i>6 000 (10 000) mm⁻¹</i>
<i>rychloposuv – osa X a Z</i>	<i>30 000 mm.min⁻¹</i>
<i>řídící systém</i>	<i>Mitsubishi M730BM</i>
<i>hydraulické sklíčidlo</i>	<i>Kitagawa 10“ BB210A821</i>
<i>pojezd koníku</i>	<i>734 mm</i>
<i>dopravník třísek</i>	<i>článekový – vynášení doprava</i>



Obr. 25: Použitý stroj

2.1.2 Použitý nástroj

Pro experiment byl použit řezný materiál dle normy ISO 3685: 1993 - vyměnitelná břitová destička **SNUN 120408** vyrobená ze slinutého karbidu dle ISO 513 - **P20** (obrázek č. 26), upnutá do držáku, viz kapitola 2.1.3 - držák destičky. Slinuté karbidy typu P20 patří do tzv. dvoukarbidové soustavy WC – TiC - Co (karbid wolframu + karbid titanu + kobaltové pojivo). Jsou určeny výhradně pro obrábění všech druhů oceli a lité oceli, svým složením umožňují obrábění nejen oceli a lité oceli, ale i všech druhů litiny, těžkoobrobitelných ocelí a slitin. Základní parametry řezného materiálu uvádí tabulka č. 9.



Obr. 26: Destička použitá při experimentu

Tabulka 9: Vlastnosti a základní chemické složení

parametr	hodnota
označení	SNUN 120408
poloměr špičky	0,8 mm
řezná rychlost maximální	200 m.min ⁻¹
doporučené rozmezí posuvů	0,12 – 0,35 mm
hlavní složky	WC (TiC + Co)
tvrdost materiálu	89 HRA
pevnost v ohybu	1 200 MPa
obsah WC	78 %
obsah TiC	14 %
obsah Co	8 %




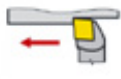




2.1.3 Držák destičky a řezná geometrie

Při experimentu byl použit držák značky CERADEX (obrázek č. 27). Držák byl vybrán s ohledem na normu ISO 3685: Tool Life of Single Point Turning Tools – pro nástroje ze slinutých karbidů. Držák nese označení: **XCSRNR2525M-1208SEN**. Jeho rozměry a tvary jsou uvedeny v tabulce č. 10.

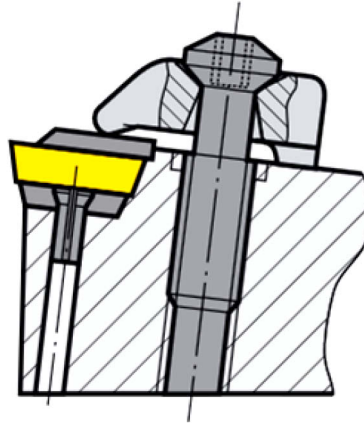


Obr. 27: Držák VBD s destičkou

Tabulka 10: Rozměry držáku CERADEX XCSRNR2525M-1207SEN [9]

Druh držáku	Způsob upnutí	Tvar destičky	Tvar nože
X Speciál Speciál	C 	S 	R  75°
Směr řezu	Výška řezu	Šířka držáku	Délka držáku
R 	 25	 25	 M 150
Velikost hrany	Tloušťka destičky	Tvar destičky	Úhel hřbetu
12,7	4,76	S 	E

Jedná se o speciální držák pro inteligentní nástroje, který umožňuje vedení elektrického signálu od VBD; tato funkce nebyla při experimentu využita, držák byl vybrán jako nejvhodnější ze všech reprezentantů, jelikož splňuje podmínky normy (pevnost v tahu, rovinnost, rovnoběžnost, řeznou geometrii). Umožňuje také nastavení příložného utvařeče třísky dle doporučení z normy. Typ upnutí VBD je na obrázku č. 28.



Obr. 28: Typ upnutí VBD – ISO C [26]

Úhel čela $\gamma = -6^\circ$

Úhel sklonu ostří $\lambda_s = -6^\circ$

Úhel nastavení hlavního ostří $\chi_r = 75^\circ$

Úhel špičky nástroje $\epsilon_r = 90^\circ$

Vyložení nástroje = 34,4 mm

2.1.4 Materiál obrobku, příprava

Jako referenční materiál obrobku byl zvolen materiál 12 050.1 (ČSN 41 2050.1) (C 45 E4 dle ISO 683-1) v normalizačně žíhaném stavu, který je etalonem obrobitelnosti pro skupinu obrobitelnosti „b“ – oceli.

Jedná se o uklidněnou (kyslík vázán křemíkem) uhlíkovou ocel, vhodnou k zušlechtní (po zušlechtní lze dosáhnout až 60 HRC) a povrchovému kalení.

Praktické využití ve strojírenství má tato ocel při výrobě hřídelů, ozubených kol, šroubů, pák, nástrojových držáků apod.

Chemické složení, mechanické vlastnosti popisují tabulky č. 11 a 12. Jedná se o výňatek z normy ČSN 41 2050.

Tabulka 11: Chemické složení oceli 12 050

Chemické složení [%]							
C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
0,42 ÷ 0,50	0,5 ÷ 0,8	0,17 ÷ 0,37	0,25	0,3	0,3	0,04	0,04

Tabulka 12: Mechanické vlastnosti oceli 12 050.1

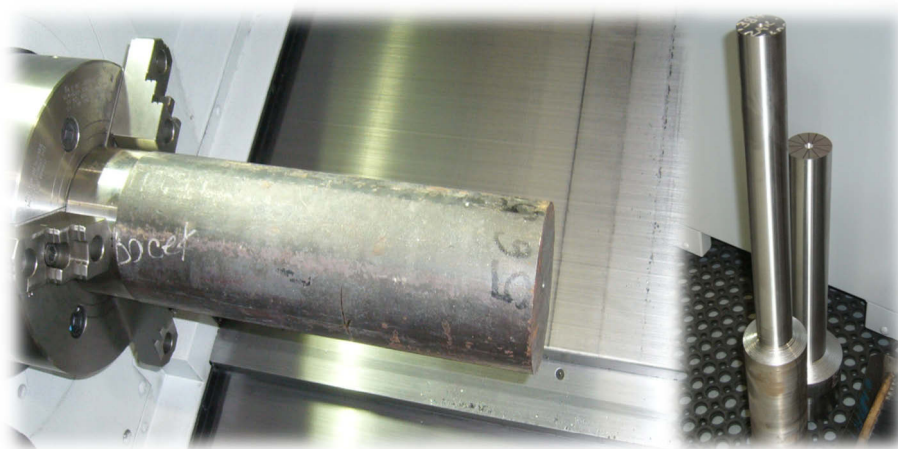
Mez kluzu R_e	305	MPa
Pevnost v tahu R_m	min. 520	MPa
Tažnost A	16	%
Kontrakce Z	-	-
Vrbová houževnatost KC	-	-
Tvrdost	225	HB
Měrná tepelná vodivost λ	49	W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Modul pružnosti ve smyku	206.10 ³	MPa

Polotovary pro obrábění ve formě tyče kruhového průřezu měly rozměry ϕ 200 mm – délka 500 mm, hmotnost obrobku cca 125 kg. Po navrtání středících důlků se polotovary upnuly do tříčelistového sklíčidla obráběcího stroje, podepřel hrotem a provedl se zarovnávací řez na výchozí jmenovitý průměr 197 mm, délku 450 mm (obrázek č. 29). Průměr obrobku je větší, než udává norma [19], není tedy brána v úvahu případná změna tvrdosti a dalších mechanických vlastností se zmenšujícím se průměrem při obrábění (výhodou je stejné chemické složení). Důvodem je také ekonomické hledisko, tedy časová náročnost a velká spotřeba materiálu při zkouškách.



Obr. 29: Příprava polotovaru pro experiment

Nespecifikovaný (neznámého složení a vlastností) materiál, u kterého je potřeba zjistit obrobitelnost, byl připraven a upnut stejným způsobem jako polotovar etalonu. Výchozí jmenovitý průměr 120 mm, délka 450 mm. A třetí nespecifikovaný materiál o rozměrech: ϕ 80-660 mm (obrázek č. 29).

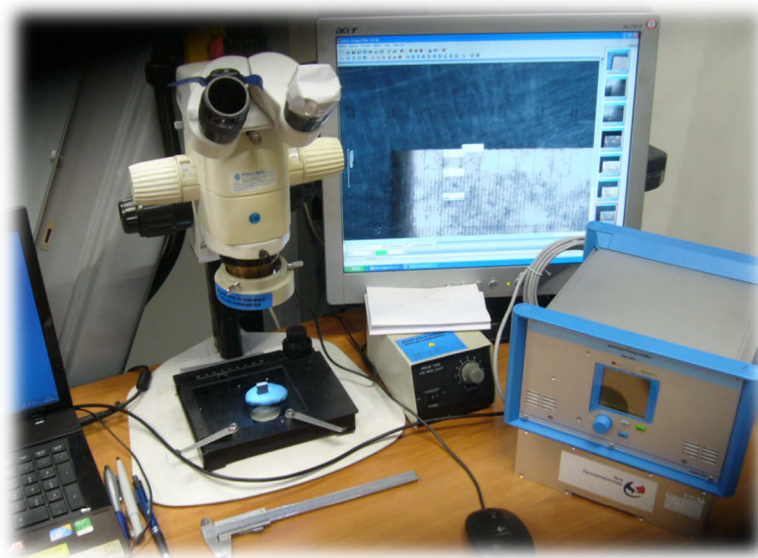


Obr. 30: Nespecifikované materiály před a po obrobení

2.1.5 Dílenský mikroskop s periferiemi

Pro měření a vyhodnocení opotřebení destičky na jejím čele a hřbetu byl použit dílenský mikroskop od firmy INTRACO MICRO spol. s r.o.. Dále byl mikroskop vybaven digitální kamerou umožňující až pětinasobné zvětšení obrazu. O zaznamenání a převod snímků do počítače se postaral software MOTIC IMAGE PLUS 2.0 ML.

Ke správnému měření opotřebení pomocí mikroskopu musel být mikroskop zkalibrován pomocí kalibrační měrky. Postup byl následující: kalibrační měrka se vyfotila ve stejné vzdálenosti a zvětšení jako destička. Tímto byl mikroskop a zaznamenávací program připraven k použití. Dílenský mikroskop v sestavě se stolním počítačem je vyobrazen na obrázku č. 31.

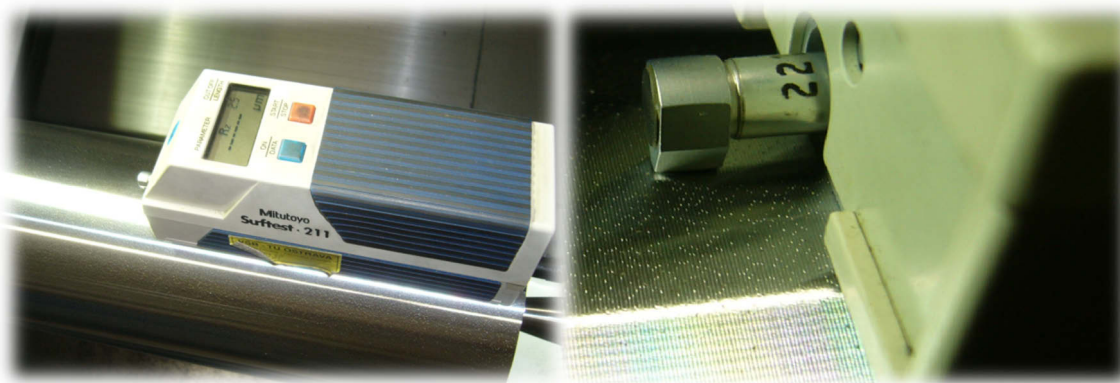


Obr. 31: Sestava dílenského mikroskopu a stolního počítače

2.1.5 Drsnoměr Mitutoyo Surftest řady SJ

Pro měření drsnosti povrchu po obrábění byl použit drsnoměr od firmy Mitutoyo. Jedná se o uživatelsky příjemný ruční měřicí přístroj, který je navržen pro použití ve výrobním prostředí. Je vybaven displejem a dvojicí tlačítek na horní straně.

Měřicí přístroj je vyobrazen na obrázku č. 32. Vyhodnocován byl parametr R_a - střední aritmetická úchylka a parametr drsnosti R_z - největší výška nerovnosti, vždy po obrobení dané délky.



Obr. 32: Mitutoyo SurfTest 211 při měření

3. Zpracování naměřených dat, vyhodnocení experimentu

Tato kapitola se zabývá zpracováním dat získaných při testech a jejich hodnocením. Kapitola je rozdělena do několika částí: první část je věnována průběhu testování referenčního materiálu 12 050.1. Druhá a třetí část se zabývá testováním nespécifikovaných materiálů. Konečně čtvrtá část je zaměřena na porovnání tvaru třísky pro jednotlivé řezné rychlosti.

Testy provedené na etalonovém materiálu byly provedeny dle doporučení vycházejících z normy ISO 3685: 1993. Tato norma udává podmínky, za kterých má obrábění probíhat. Mezi tyto podmínky patří hodnoty posuvu, řezných rychlostí, hloubky záběru, typ řezného prostředí, tvar třísek, velikost kritérií opotřebení nástroje apod.

Testy probíhaly za níže uvedených dohodnutých **řezných** podmínek:

KONSTATNÍ PARAMETRY:

- posuv $f = 0,25 \text{ mm.ot}^{-1}$
- hloubka záběru $a_p = 2 \text{ mm}$

PROMĚNNÉ PARAMETRY:

- řezná rychlost $v_c = 100; 125; 160; 200 \text{ m.min}^{-1}$

Testovány byly čtyři řezné rychlosti pro etalonový materiál. Vždy po obrobení jedné délky bylo provedeno měření drsnosti povrchu (parametry R_a , R_z) a měření velikosti opotřebení řezného nástroje pomocí mikroskopu, hodnoty byly zaznamenány do tabulek.

Parametry opotřebení, které bylo možno změřit či posoudit:

- VB_B - opotřebení přímé části ostří průměrné [mm]
- VB_{Bmax} - opotřebení hřbetu nástroje maximální [mm]
- VB_N - opotřebení ve formě vrubu [mm]
- KB - šířka žlábků [mm]

Společná kritéria opotřebení pro nástroje ze SK udává norma. Největší přípustná šířka opotřebení $VB_{Bmax} = 0,6 \text{ mm}$ v případě nerovnoměrného opotřebení hřbetu v pásmu B. Průměrná velikost opotřebení hřbetu v pásmu B $VB_B = 0,3 \text{ mm}$, v případě rovnoměrného opotřebení (viz kap. 1.5.1, obrázek č. 22). Hloubka kráteru je dána velikostí posuvu a neměla by přesáhnout pro posuv $0,25 \text{ mm.ot}^{-1}$ více než $0,14 \text{ mm}$ - tento parametr nebyl měřen. Řezné prostředí je dáno normou [19], má probíhat za sucha.

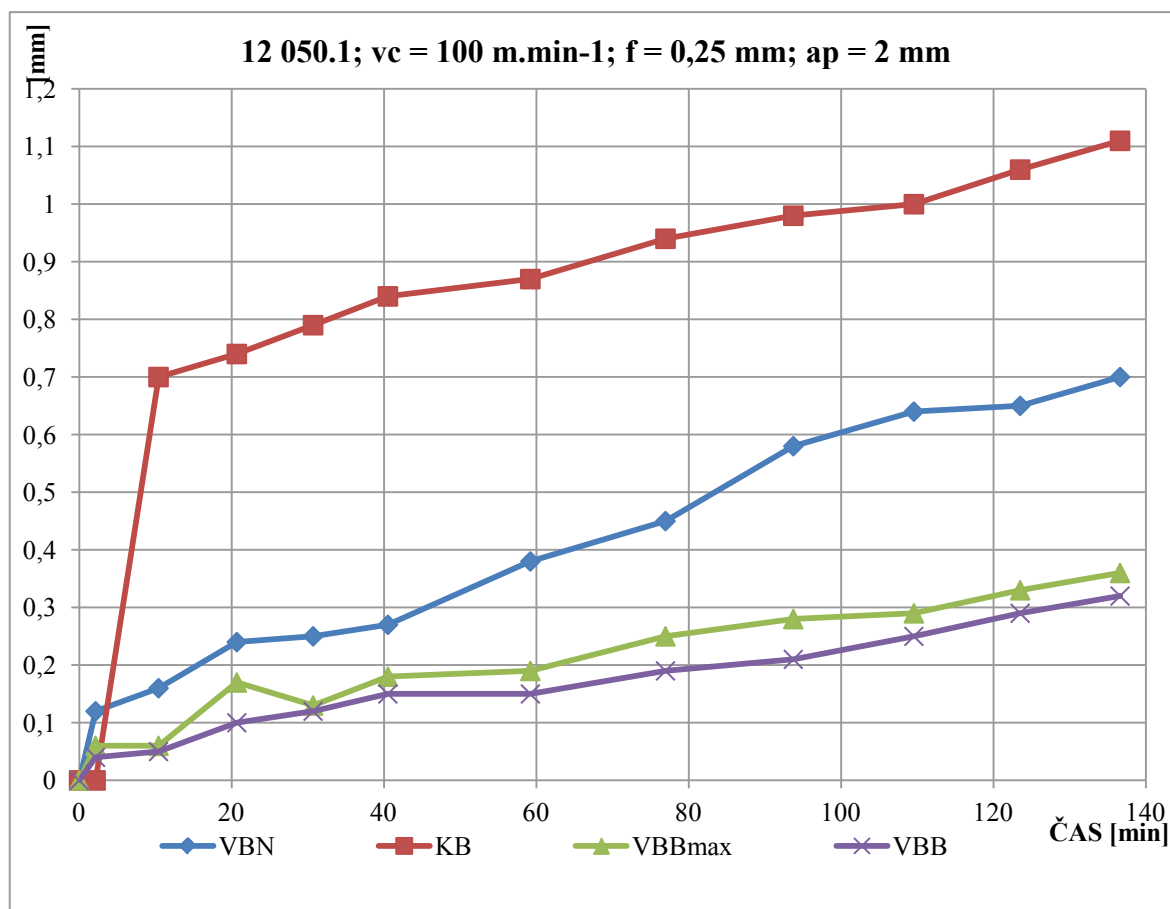
3.1 Testování materiálu 12 050.1

3.1.1 Řezná rychlost $v_c = 100 \text{ m.min}^{-1}$

Test začíná řeznou rychlostí 100 m.min^{-1} . Při této řezné rychlosti bylo sledováno opotřebení nástroje a byla změřena drsnost povrchu vždy po jednom provedeném řezu. Celkem se při této řezné rychlosti provedlo 11 záběrů do opotřebení na zvolené kritérium opotřebení. Celková délka obrábění činila $6\,652 \text{ mm}$ a celkový čas nástroje v řezu byl $136,64 \text{ minut}$.

Pro tuto a každou následující řeznou rychlost jsou zpracovány následující grafy závislostí:

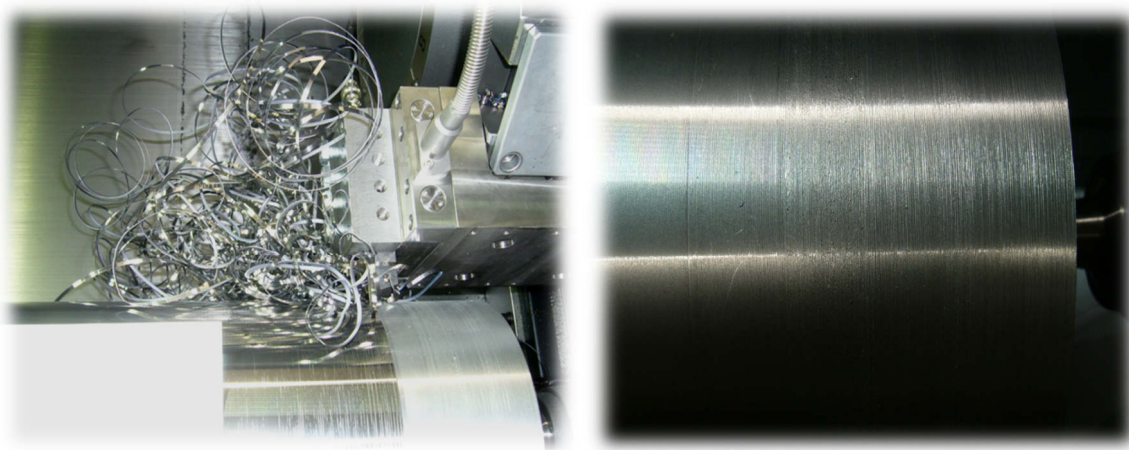
a/ závislost opotřebení na čase pro jednotlivé parametry opotřebení:



Obr. 33: Závislosti opotřebení na čase pro $v_c = 100 \text{ m.min}^{-1}$

Průběh opotřebení při této řezné rychlosti byl v jednotlivých částech ostří různý (obrázek č. 32). Na začátku obrábění (do délky $L = 89 \text{ mm} - 2,16 \text{ min}$) se začala tvořit dlouhá, táhlá, souvislá tříska. Tento stav koliduje s normou a takováto tříska není při obrábění žádoucí, proto byl proces v dané délce záměrně zastaven (obrázek č. 34). Po překontrolování utvařeče třísky a kontrole VBD nebyl shledán žádný problém, proběhlo měření drsnosti povrchu. Obrábění probíhalo dále bez komplikací.

Vývoj všech typů opotřebení byl téměř lineární, pouze u hodnoty KB - šířky žlábků, dochází až od třetího řezu k podobnému vývoji jako u ostatních typů opotřebení. Do této hodnoty je nárůst velmi rychlý. Křivka zobrazující vývoj nárůstu šířky žlábků značí rychlý záběh nástroje, mírnou stagnaci v polovině obrábění a nárůst spojený s konečnou fází zrychleného opotřebení.



Obr. 34: Zastavení obrábění v délce $L = 89 \text{ mm}$ (2,16 min) od čela

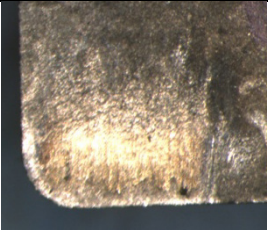
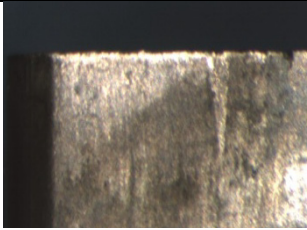
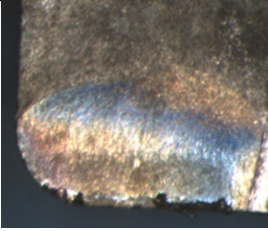
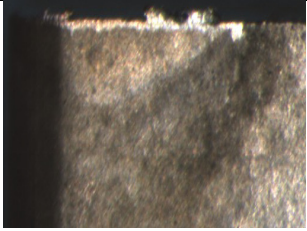
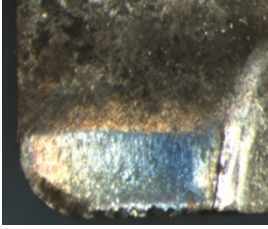
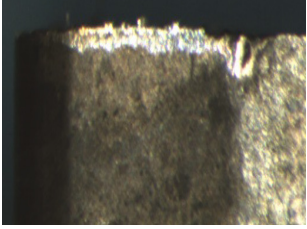
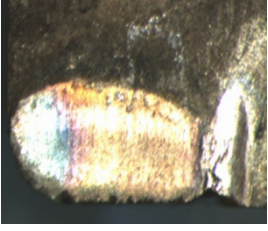
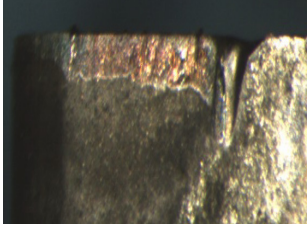
Za povšimnutí stojí nárůst opotřebení KB (šířka žlábků na čelní ploše nástroje) v čase 10,4 minut, do této doby se tvořila třísky delší než po zbytek obrábění (obrázek č. 34 a 35), ale již přijatelného tvaru - od páskové, až po téměř drobivou. Ke konci obrábění - při posledním řezu, se tvar třísky blížil k tvaru třísky tvořené na počátku obrábění.



Obr. 35: Vývoj tvaru třísky od počátku po konec obrábění

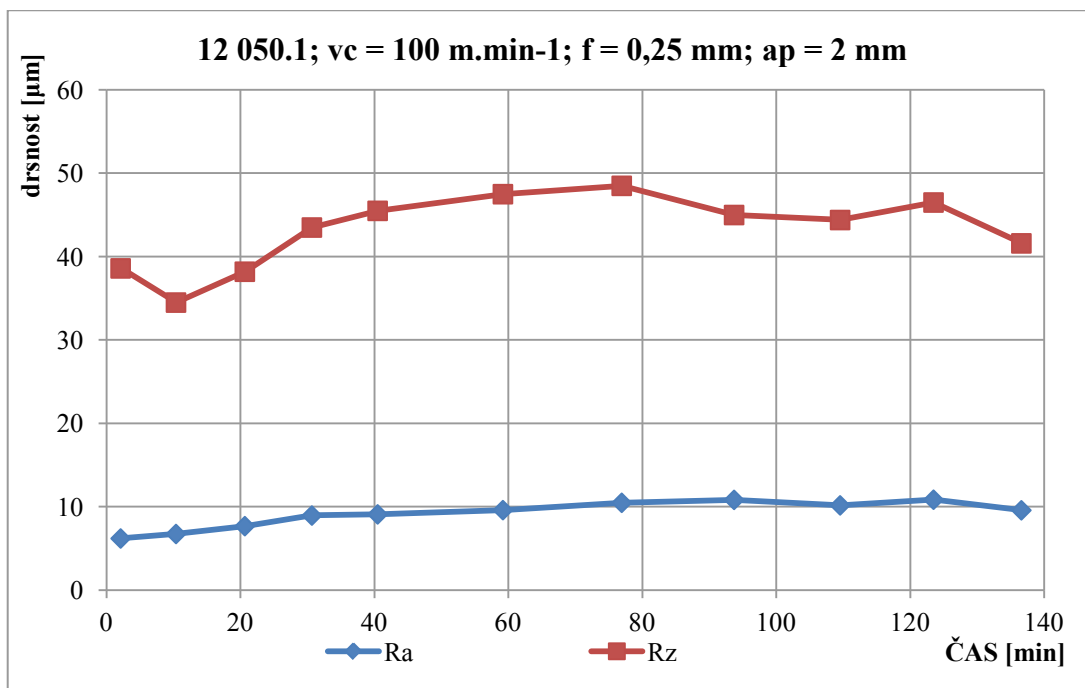
Průběh opotřebení VBD na čele a hřbetu je v tabulce č. 13. Od 10. minuty až po 40. minutu se na nástroji tvořil nepatrný nárůstek. Opotřebení na hřbetu nástroje lze považovat za rovnoměrné.

Tabulka 13: Ukázka průběhu opotřebení nástroje pro $v_c = 100 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

ČAS OBRÁBĚNÍ [min]	čelo nástroje	hřbet nástroje
2,16		
10,42		
40,53		
136,64		

b/ závislost drsnosti povrchu na čase obrábění:

Na obrázku č. 36 je graf závislosti obou měřených parametrů na čase obrábění. Křivka zobrazující vývoj drsnosti Rz je dosti podobná křivce zobrazující opotřebení parametru KB. Střední aritmetická úchylka Ra má klidný průběh s mírným nárůstem hodnot. Hodnoty Ra se pohybují v rozmezí od $6,2 \mu\text{m}$ do $10,84 \mu\text{m}$. Průměrná hodnota $Ra = 9,12 \mu\text{m}$. Průměrná hodnota parametru $Rz = 43,07 \mu\text{m}$.



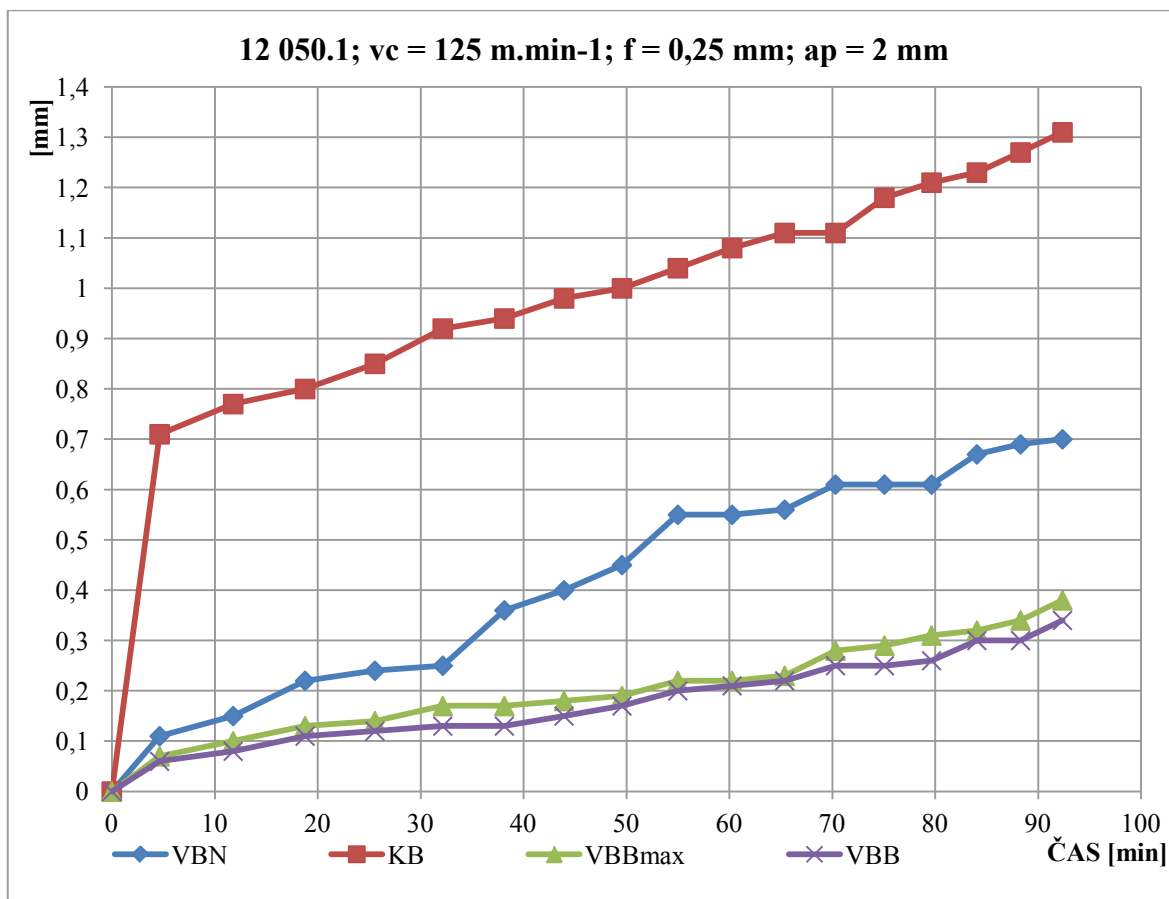
Obr. 36: Závislost drsnosti povrchu na čase pro $v_c = 100 \text{ m.min}^{-1}$

3.1.2 Řezná rychlost $v_c = 125 \text{ m.min}^{-1}$

Test začíná řeznou rychlostí 125 m.min^{-1} . Při této řezné rychlosti bylo sledováno opotřebení nástroje a byla změřena drsnost povrchu vždy po jednom provedeném řezu. Celkem se při této řezné rychlosti provedlo 17 záběrů do opotřebení na zvolené kritérium. Obrábění probíhalo klidně, nedošlo k žádné zvláštní události. Celková délka obrábění činila 6 907 mm a celkový čas nástroje v řezu byl 92,37 minut.

a/ závislost opotřebení na čase pro jednotlivé parametry opotřebení:

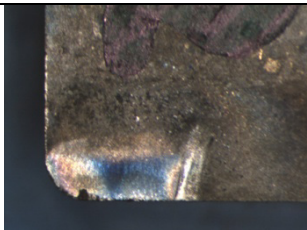
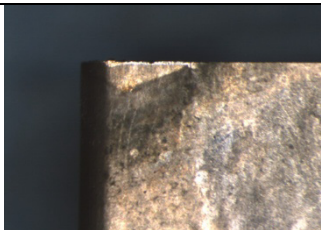
Opotřebení bylo podobné jako u řezné rychlosti 100 m.min^{-1} . Nejedná se o příliš velký rychlostní rozdíl. Křivky mají podobný průběh jako v předchozím případě. Graf závislosti opotřebení na čase obrábění je na obrázku č. 37.

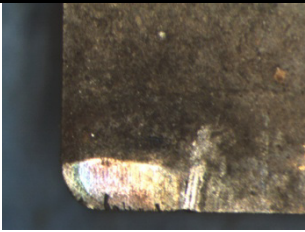
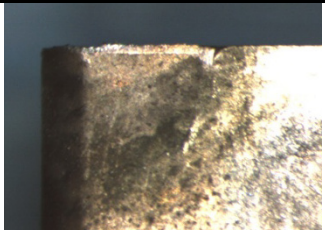
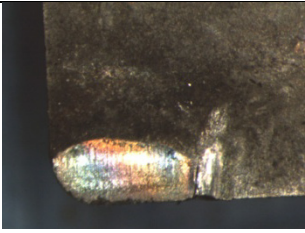
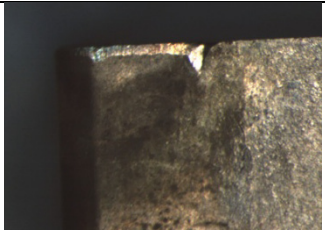
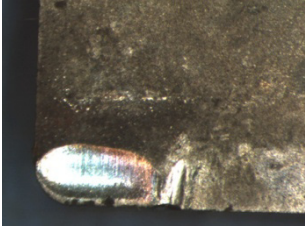
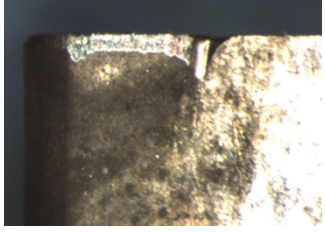
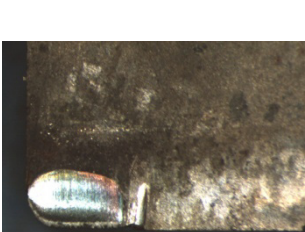
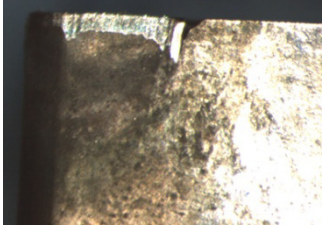
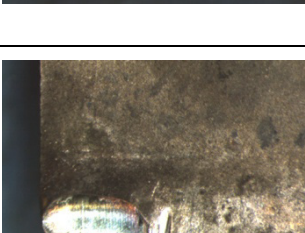



Obr. 37: Průběh opotřebení na čase pro $v_c = 125 \text{ m.min}^{-1}$

Grafický průběh opotřebení VBD na čele a hřbetu je zobrazen v tabulce č. 14. Při této řezné rychlosti se netvořil vrub na hřbetu nástroje. Opotřebení v zóně b je rovnoměrné. Šířka žlábků na čelní ploše je užší než u předchozí řezné rychlosti a žlábek je dle odhadu hlubší než v předchozím případě.

Tabulka 14: Ukázka průběhu opotřebení nástroje pro $v_c = 125 \text{ m.min}^{-1}$

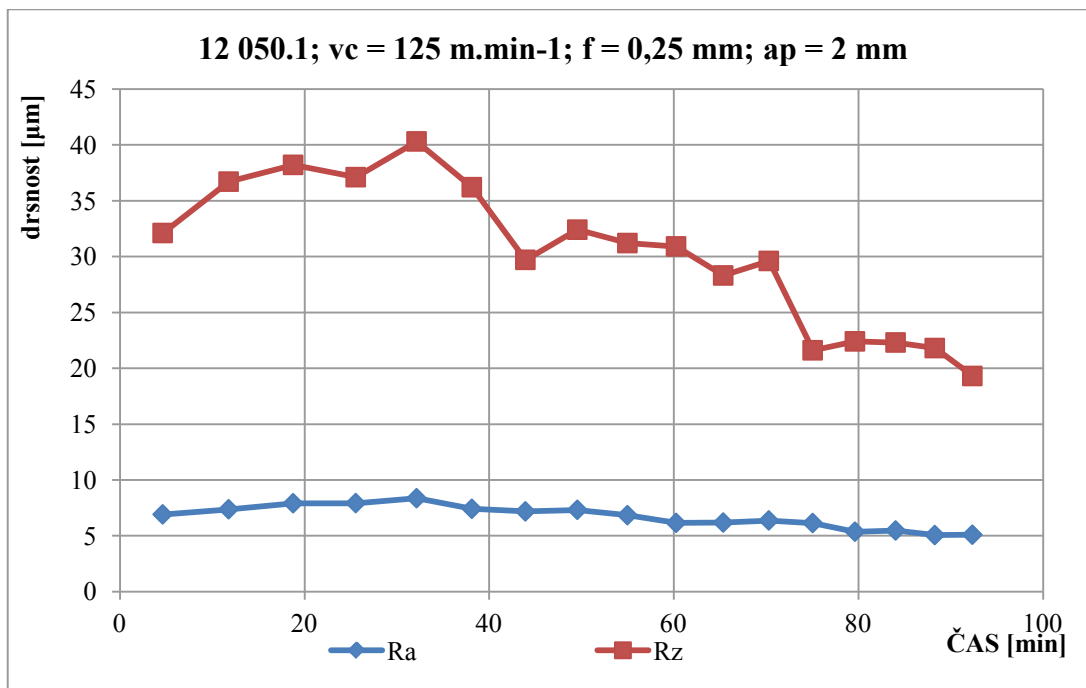
ČAS OBRÁBĚNÍ [min]	čelo nástroje	hřbet nástroje
4,65		

25,57		
49,57		
70,32		
84,05		
92,37		

b/ závislost drsnosti povrchu na čase obrábění:

Na obrázku č. 38 je zobrazen graf závislosti obou měřených parametrů na čase obrábění.

Křivka zobrazující vývoj drsnosti Rz zaznamenává rychlý nárůst hodnot, po 30 minutách pozvolně klesá a ke koci obrábění opět roste. Střední aritmetická úchylka Ra má klidný průběh s mírným nárůstem hodnot. Hodnoty Ra se pohybují v rozmezí od 5 μm do 8,3 μm .



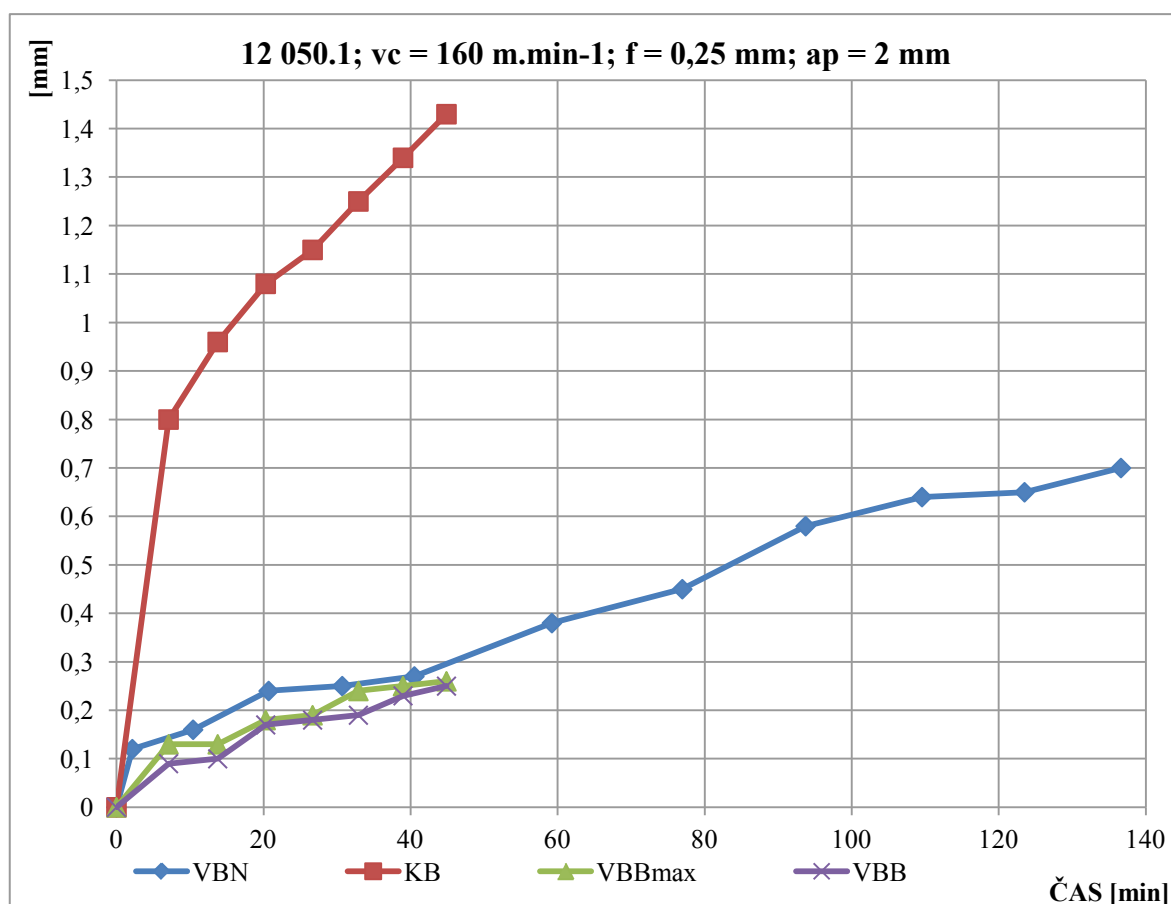
Obr. 38: Závislost drsnosti povrchu na čase pro $v_c = 125 \text{ m.min}^{-1}$

3.1.3 Řezná rychlost $v_c = 160 \text{ m.min}^{-1}$

Test řeznou rychlostí 160 m.min^{-1} . Při této řezné rychlosti bylo sledováno opotřebení nástroje a byla změřena drsnost povrchu vždy po jednom provedeném řezu. Celkem se při této řezné rychlosti provedlo 8 záběrů, ale nebylo dosaženo kritérium opotřebení $0,3 \text{ mm}$ z důvodu vylomení břitu nástroje. Měření bylo ukončeno, celková délka obrábění činila $3\,299,5 \text{ mm}$ a celkový čas nástroje v řezu byl $47,03 \text{ minut}$.

Pro tuto řeznou rychlost jsou zpracovány následující grafy závislosti:

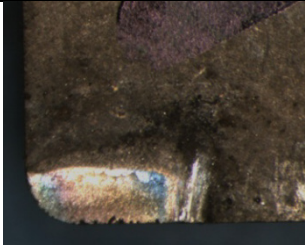

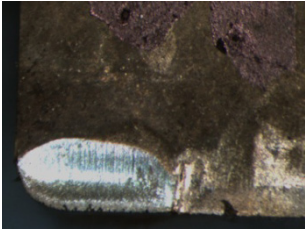

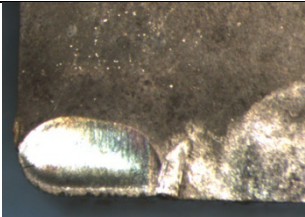
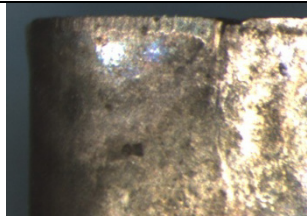
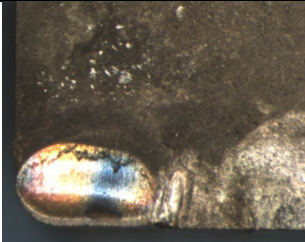
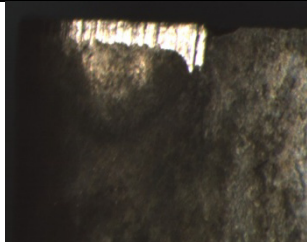
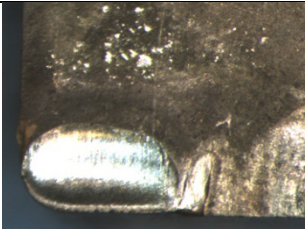
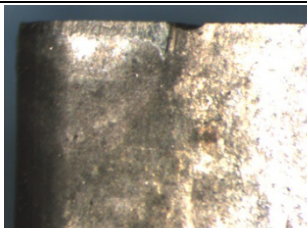
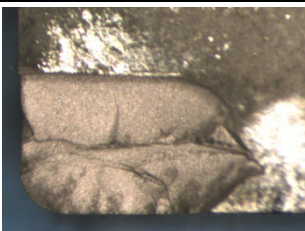

a/ závislost opotřebení na čase pro jednotlivé parametry opotřebení



Obr. 39: Závislosti opotřebení na čase pro $v_c = 160 \text{ m.min}^{-1}$

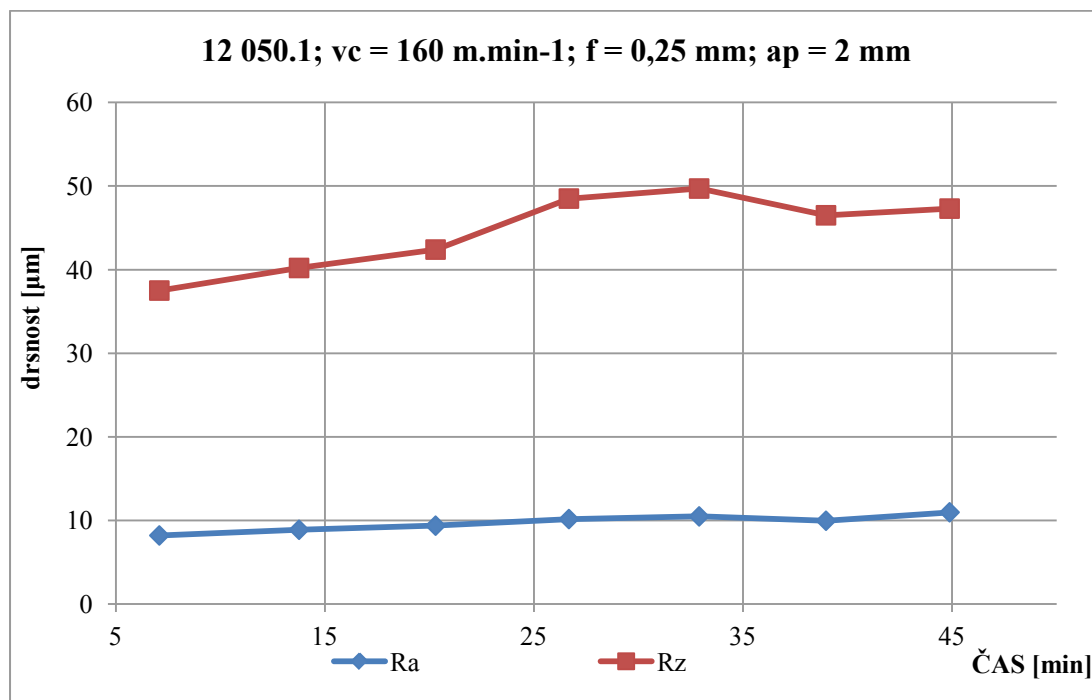
Průběh opotřebení při této řezné rychlosti je na obrázku č. 39. Vývoj všech typů opotřebení byl téměř stejný jako u ostatních řezných rychlostí. Žlábek na čele měl podobnou šířku jako u rychlosti 125 m.min^{-1} , ale hloubka byla při posouzení pohledem větší. Při posledním řezu došlo v délce 165 mm od čela obrobku k vylomení břitu (šířka odlomené části při pohledu na čelní plochu byla 2,38 mm; hloubka odlomení 1,2 mm). Průběh opotřebení na čelní a hřbetní ploše v čase je uveden na obrázcích v tabulce č. 15 (poslední obrázek poukazuje na odlomené ostří). Vrubové opotřebení nebylo tak velké jako u ostatních rychlostí ($v_c = 160 \text{ m.min}^{-1}$ – VBN = 0,56; u ostatních řezných rychlostí vždy přesáhlo toto opotřebení hodnotu 0,7 mm), lom tedy nebyl očekáván.

Tabulka 15: Ukázka průběhu opotřebení nástroje pro $v_c = 160 \text{ m.min}^{-1}$

ČAS OBRÁBĚNÍ [min]	čelo nástroje	hřbet nástroje
7,09		
20,30		
32,91		
38,98		
44,89		
47,03		

b/ závislost drsnosti povrchu na čase obrábění:

Na obrázku č. 40 je graf závislosti obou měřených parametrů drsnosti na čase obrábění. Střední aritmetická úchylka R_a má pozvolný průběh, hodnoty jsou stále blízké hodnotě $10\ \mu\text{m}$ a příliš nekolísají. Průběh R_z se podobá průběhu při řezné rychlosti $100\ \text{m}\cdot\text{min}^{-1}$. Nejvyšší naměřená hodnota parametru $R_z = 49,7\ \mu\text{m}$.

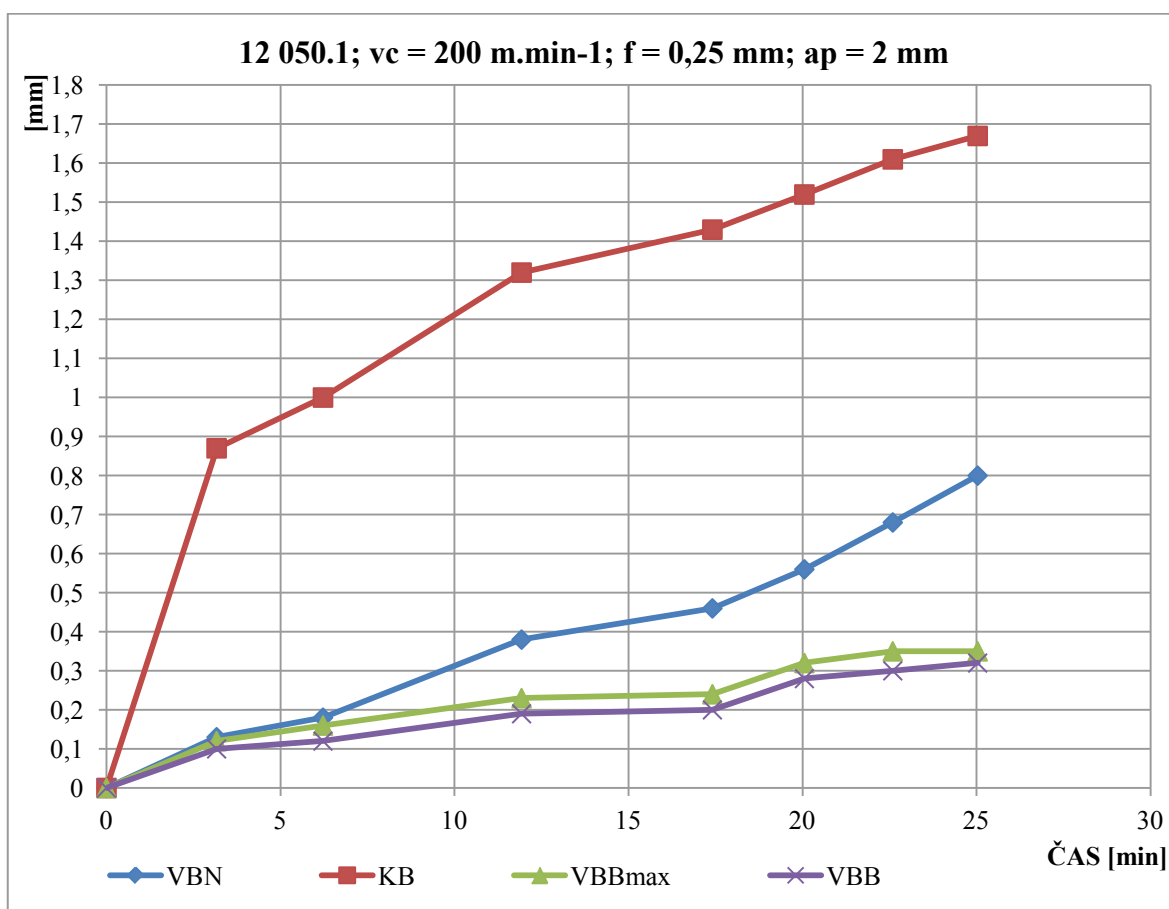


Obr. 40: Závislost drsnosti povrchu na čase pro $v_c = 160\ \text{m}\cdot\text{min}^{-1}$

3.1.4 Řezná rychlost $v_c = 200\ \text{m}\cdot\text{min}^{-1}$

Test řeznou rychlostí $200\ \text{m}\cdot\text{min}^{-1}$. Test probíhal s obavami, že dojde k vylomení břitu dříve než při řezné rychlosti $160\ \text{m}\cdot\text{min}^{-1}$. Celkem u tohoto měření bylo provedeno 7 záběrů do opotřebení na zvolené kritérium. Celková délka obrábění činila $3\ 450\ \text{mm}$ a celkový čas nástroje v řezu byl $25,04$ minut. Na obrázku č. 41 je vyobrazen graf závislosti opotřebení na čase.

a/ závislost opotřebení na čase pro jednotlivé parametry opotřebení

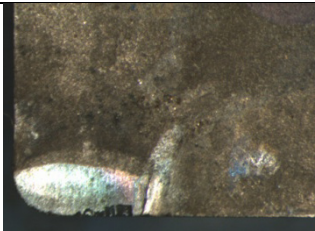
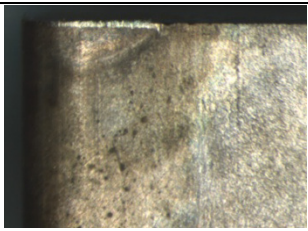


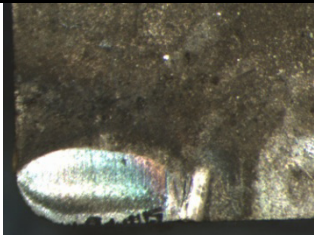







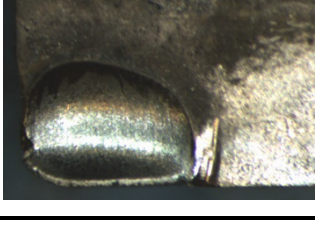
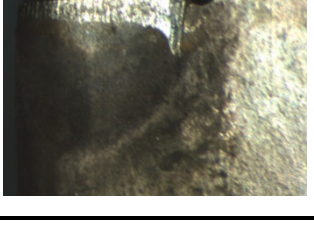
Obr. 41: Závislosti opotřebení na čase pro $v_c = 200 \text{ m.min}^{-1}$

Vývoj všech typů opotřebení byl podobný v porovnání s ostatními měřeními. Pouze hodnoty KB zde dosahují doposud nejvyšších hodnot. Hloubka žlábků při vizuální kontrole byla zatím největší.

Opotřebení na hřbetu nástroje mělo nejprve rovnoměrný průběh, od 15. minuty se opotřebení zvětšuje směrem k vrubu; viz fotografie v tabulce č. 16.

Tabulka 16: Ukázka průběhu opotřebení nástroje pro $v_c = 200 \text{ m.min}^{-1}$

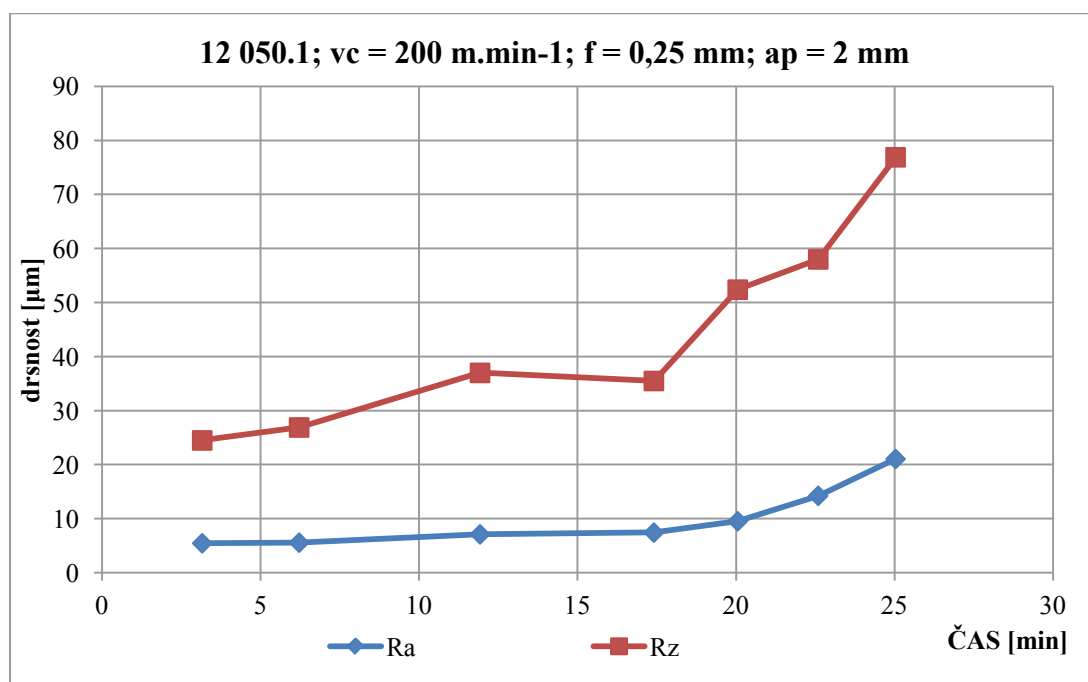
ČAS OBRÁBĚNÍ [min]	čelo nástroje	hřbet nástroje
3,17		

6,22		
17,41		
20,06		
22,60		
25,04		

b/ závislost drsnosti povrchu na čase obrábění:

Výsledky měření drsnosti povrchu jsou zobrazeny na obrázku č. 42 - graf závislosti obou měřených parametrů na čase obrábění.

Křivka zobrazující vývoj drsnosti Rz je cca do 17 minut pod úrovní hodnoty 40 μm , poté prudce stoupá až na dvojnásobnou hodnotu. Vývoj křivky Ra je příznivý, hodnoty jsou stále pod 10 μm , ke konci (do 18. minuty) následuje vzrůst hodnot na více než dvojnásobek.

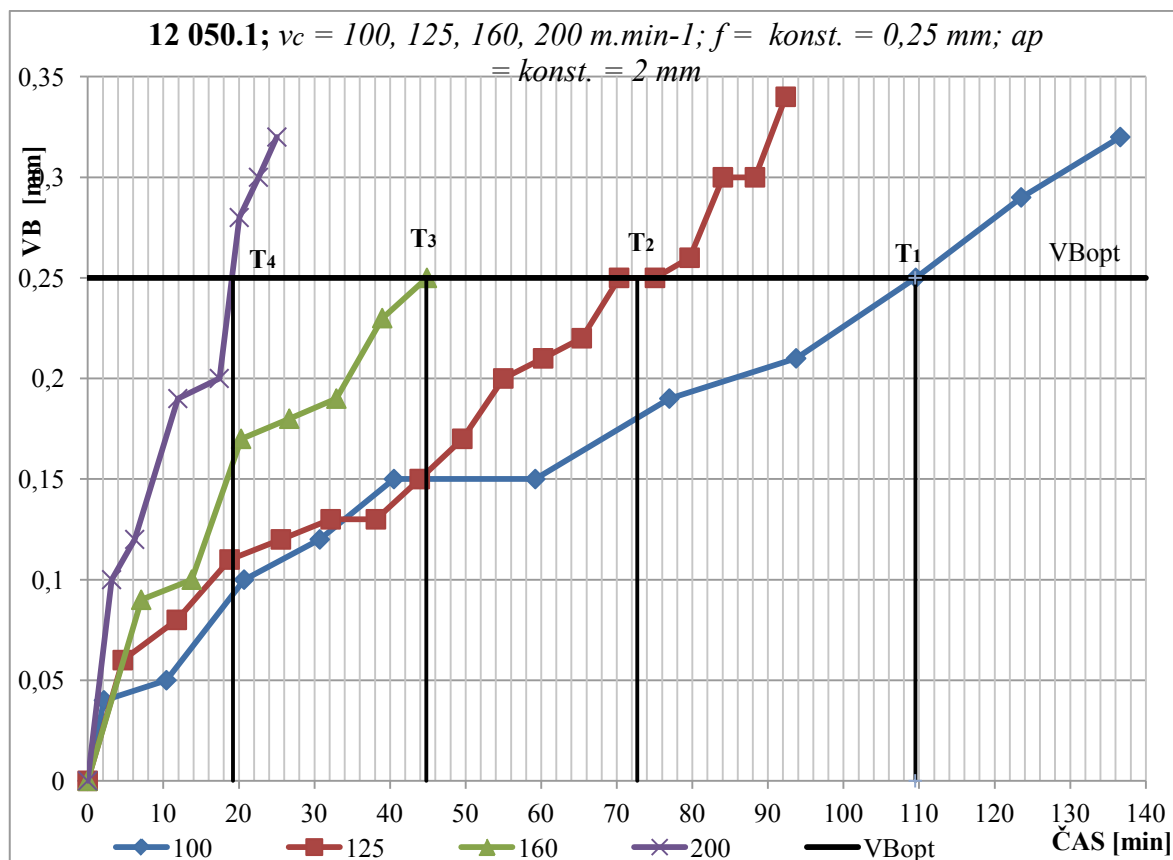


Obr. 42: Závislost drsnosti povrchu na čase pro $v_c = 200 \text{ m.min}^{-1}$

3.1.5 Grafy závislostí $VB = f(t)$, $T = f(v_c)$

Byl sestaven graf závislosti velikosti opotřebení na čase obrábění pro každou řeznou rychlost. Kritérium opotřebení optimální (VB_{opt}), bylo i s ohledem na vylomení nástroje při řezné rychlosti 160 m.min^{-1} (vylomení při $VB =$ právě $0,25 \text{ mm}$), stanoveno na hodnotu $VB_{opt} = 0,25 \text{ mm}$. Budeme předpokládat, že lom nastal v době, kdy byla hranice $0,25 \text{ mm}$ již překročena, za jiných okolností by nástroj vydržel do svého opotřebení řezat delší dobu. Volba VB_{opt} na danou mez proběhla i s ohledem na vývoj drsnosti povrchu, jehož kvalita se při překročení této hodnoty začínala ve většině případů méně či více zhoršovat. Hodnota VB_{opt} byla stanovena na hranici $0,25 \text{ mm}$ i s přihlédnutím k extrémně dlouhé výdrží ostří, a to jak při nízkých, tak i vysokých řezných rychlostech. Při porovnání jiných grafů, uvádějících závislosti opotřebení na čase pro referenční materiál 12 050.1, kde bylo dosahováno kritéria opotřebení ($0,3 \text{ mm}$) již po 20 minutách obrábění, při řezné rychlosti 100 m.min^{-1} , bylo v našem případě totéž kritérium při stejné řezné rychlosti překročeno až po více než dvou hodinách obrábění a přes 20 minut vydržel nástroj řezat při dvojnásobné řezné rychlosti. Tento jev lze přisoudit vlastnostem použitého stroje, který díky své extrémní tuhosti nedovoluje vzniku nežádoucích chvění a vibrací, které mají na trvanlivost nástroje podstatný vliv.

Graf je na obrázku č. 43. Na základě zvolené míry opotřebení byly odečteny hodnoty trvanlivostí pro každou řeznou rychlost, které jsou uvedeny v tabulce č. 17.

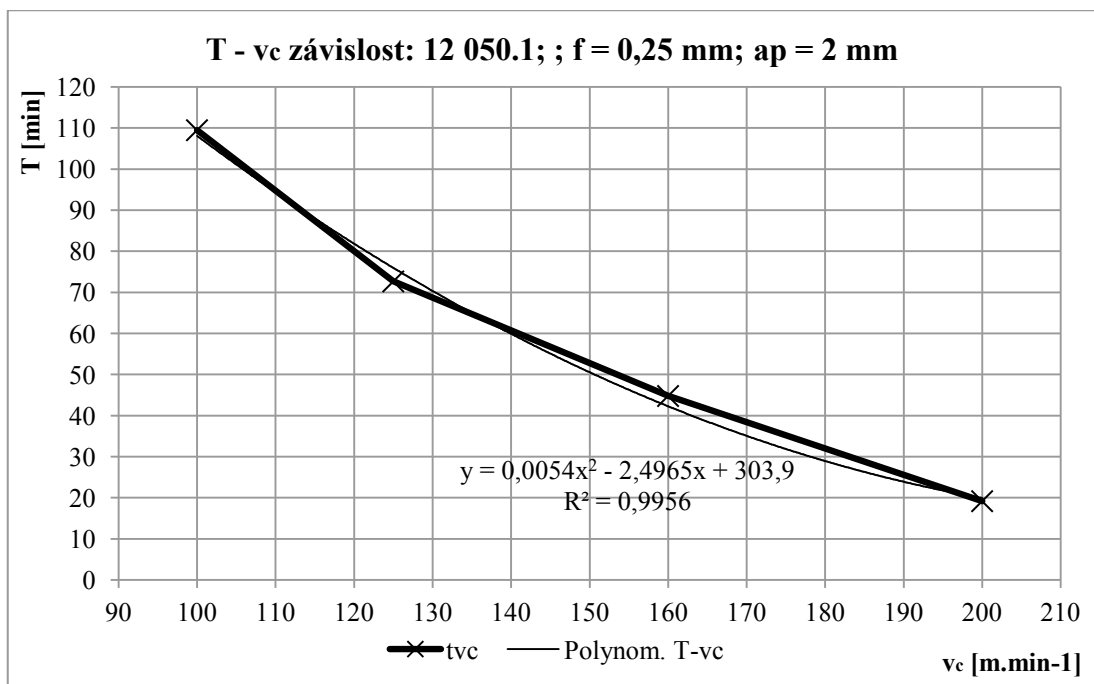


Obr. 43: Graf závislosti $VB = f(t)$ pro všechny řezné rychlosti

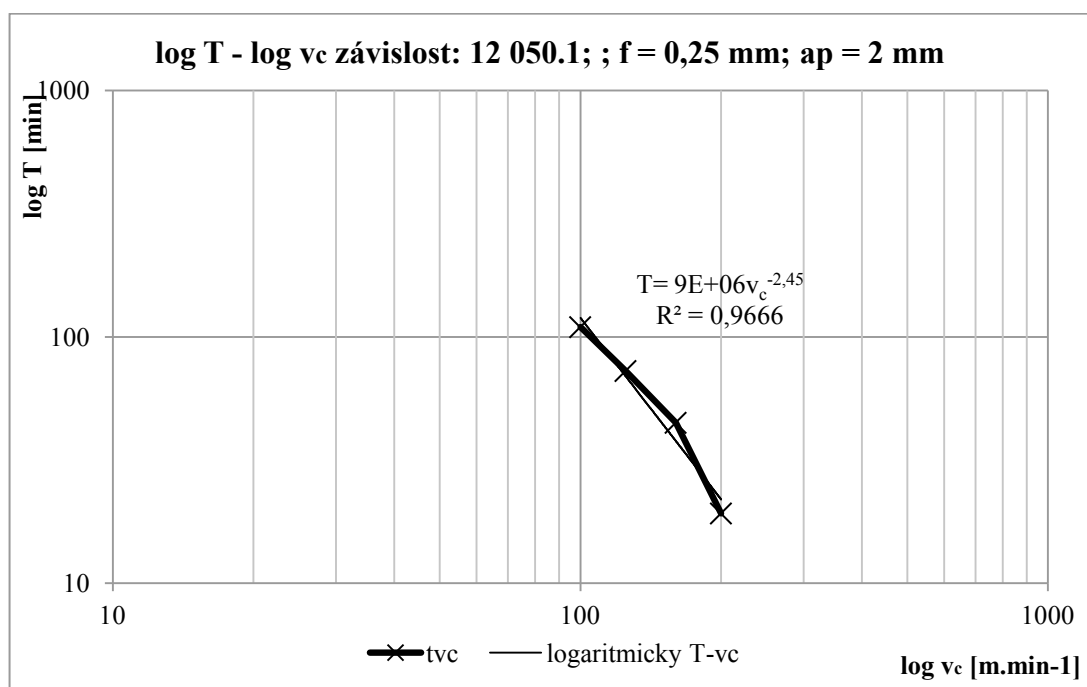
Tabulka 17: Odečtené hodnoty trvanlivostí

Trvanlivost [min]	
$T1_{100}$	109,5
$T2_{125}$	72,69
$T3_{160}$	44,8
$T4_{200}$	19,2

Na základě odečtených hodnot trvanlivostí pro každou řeznou rychlost byl sestaven graf závislosti trvanlivosti na řezné rychlosti (obrázek č. 44) a graf závislosti $T - v_c$ v logaritmických souřadnicích (obrázek č. 45). Pro vybranou optimální trvanlivost se stanovil index obrobitelnosti, aby bylo možné srovnání řezné rychlosti zkoumaného materiálu s řeznou rychlostí materiálu referenčního (etalonového).



Obr. 44: Graf závislosti T - v_c



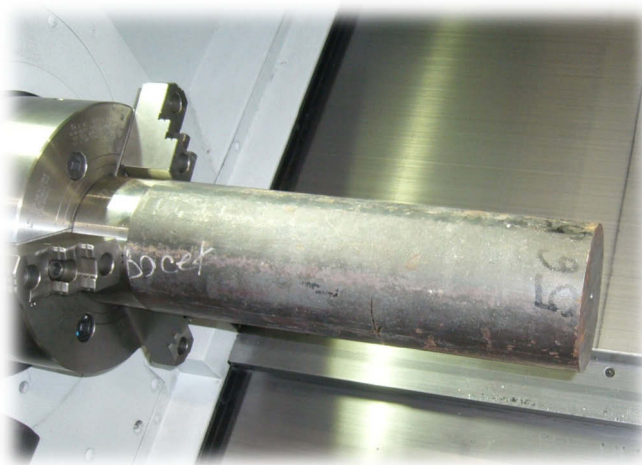
Obr. 45: Graf závislosti log T – log v_c

Výsledná rovnice trvanlivosti je vyznačena v grafu - obrázek č. 45.

3.2 Testování nespecifikovaného materiálu

3.2.1 Materiál č. 1

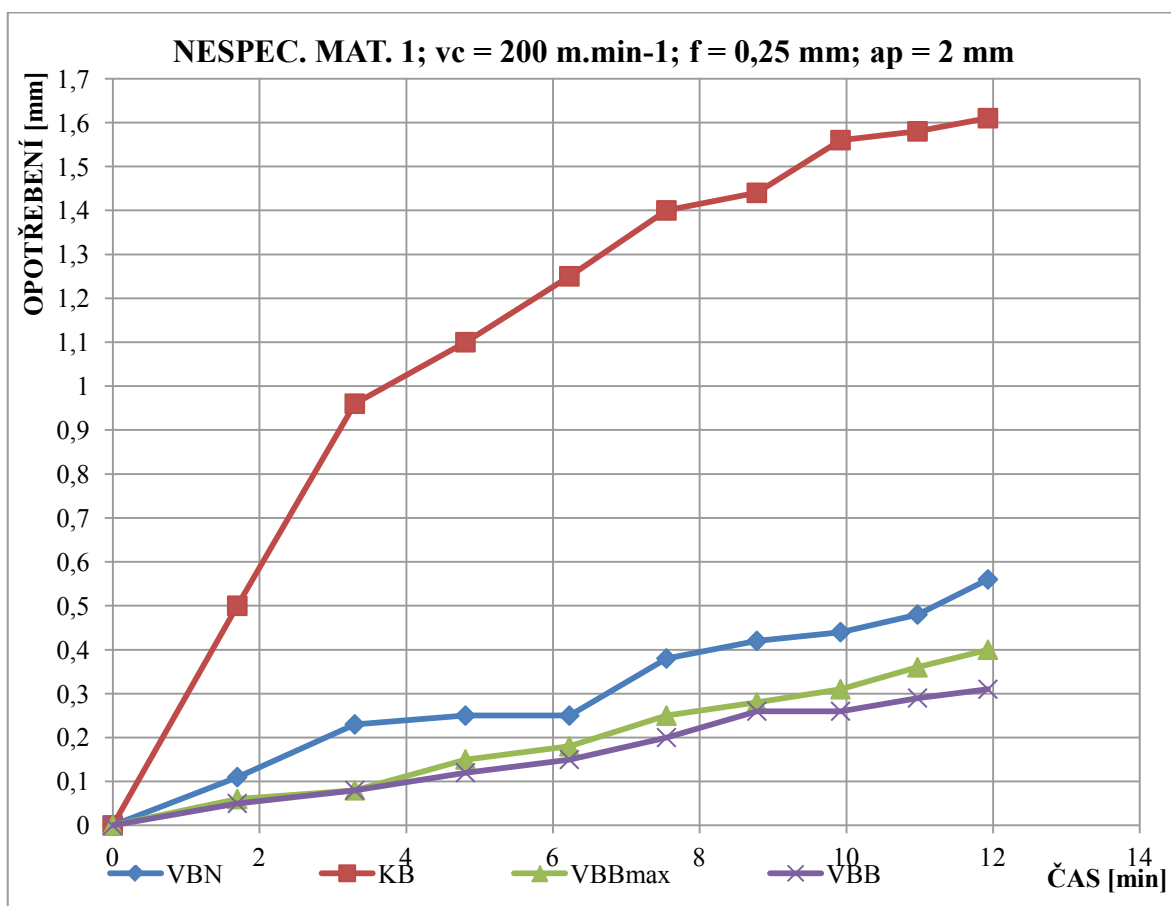
Materiál neznámých vlastností a chemického složení byl upnut stejně jako referenční materiál (sklíčidlo - podepření hrotem). Jeho rozměry: ϕ 120-450 mm (obrázek č. 46).



Obr. 46: Nespecifikovaný materiál, upnutí

Celkem bylo provedeno 7 řezů, celková délka obrábění 4 949 mm. Čas, po který nástroj řezal třísku do stanovené míry opotřebení: 27,43 min. Vzhledem k faktu, že tento materiál byl obroben na kritický průměr 64 mm, byl proveden pouze test řeznou rychlostí $v_c = 200 \text{ m.min}^{-1}$.

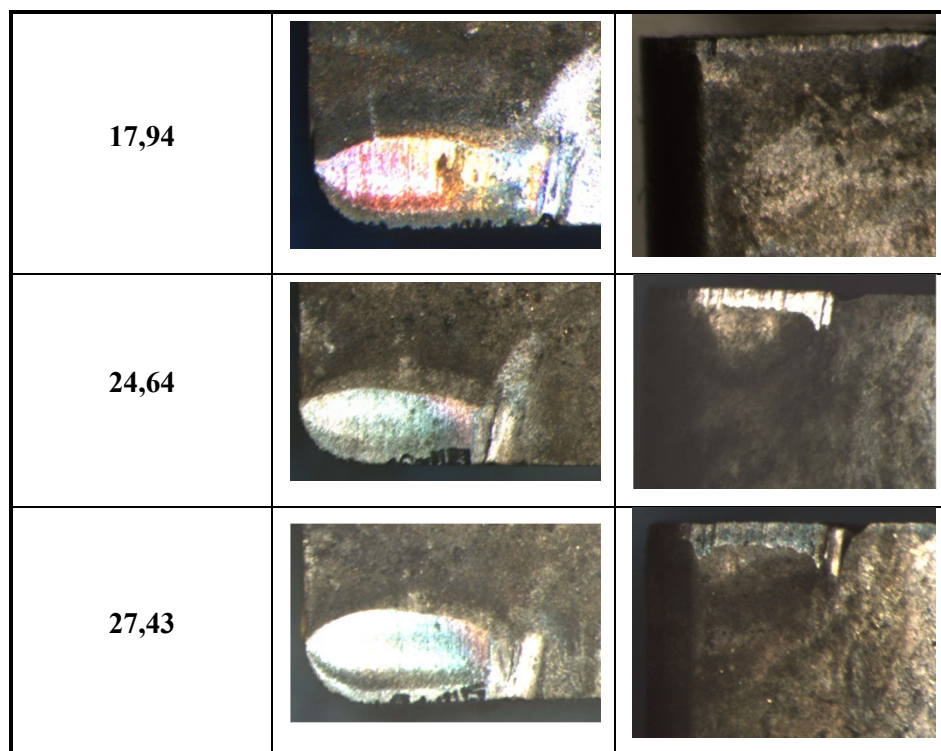
Pro tento materiál byl vytvořen graf závislosti opotřebení na čase (obrázek č. 47) a graf závislosti drsnosti povrchu na čase, který je na obrázku č. 48. Opotřebení bylo velmi podobné průběhu opotřebení při obrábění referenčního materiálu řeznou rychlostí 200 m.min^{-1} .



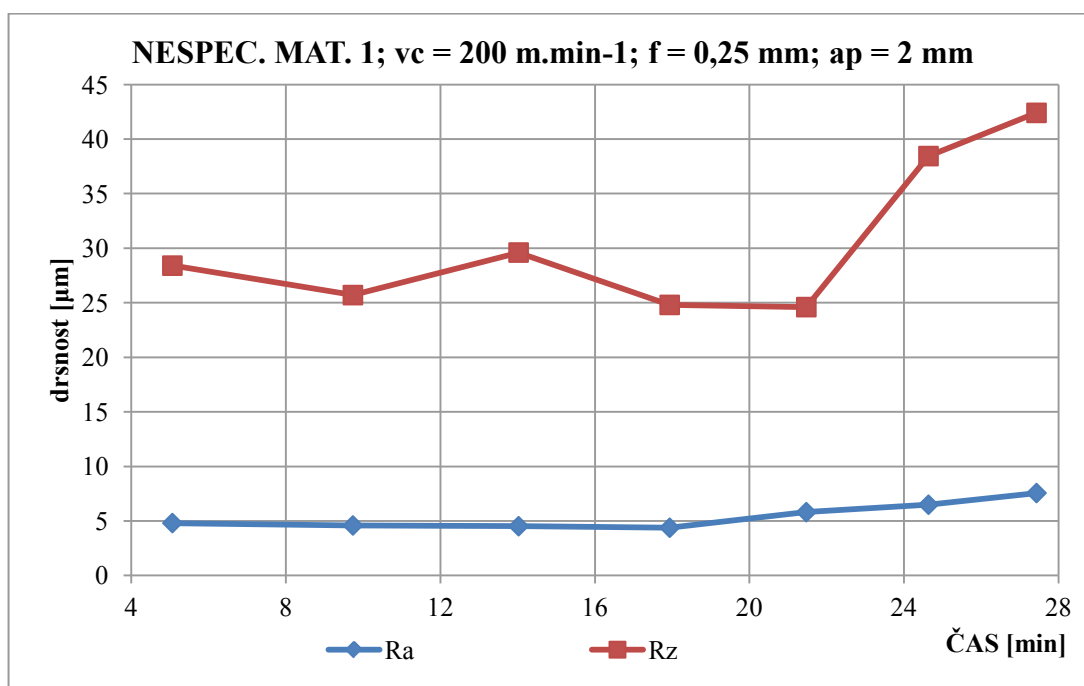
Obr. 47: Graf závislosti opotřebení na čase

Tabulka 18: Ukázka průběhu opotřebení nástroje – nespecifikovaný mat. č. 1

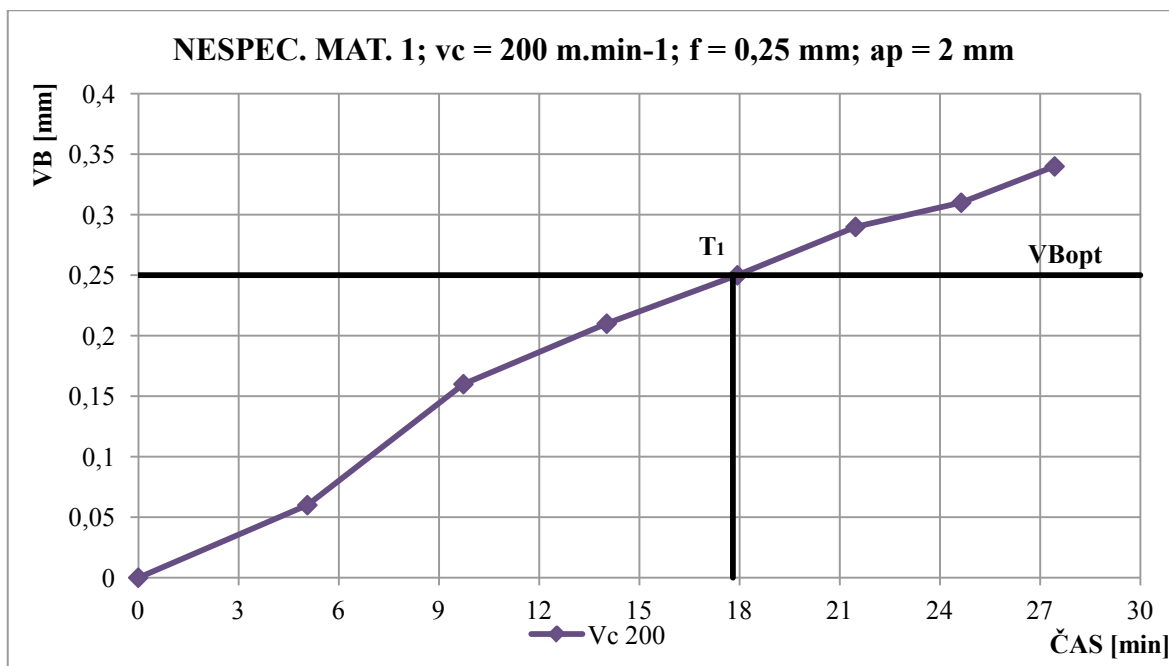
ČAS OBRÁBĚNÍ [min]	čelo nástroje	hřbet nástroje
5,06		
9,74		



Drsnost povrchu po obrábění dosahovala velmi příznivých hodnot, většinou pod $5\text{ }\mu\text{m}$, pouze v závěru obrábění přichází zhoršení (viz obrázek č. 48). Totéž platí pro parametr drsnosti R_z , který byl udržován pod hodnotou $25\text{ }\mu\text{m}$. Tyto hodnoty jsou dosahovány přibližně do času obrábění 19 minut a jsou výhodné i pro kritérium opotřebení VB_{opt} .



Obr. 48: Vývoj drsnosti povrchu na čase obrábění



Obr. 49: Graf VB - t pro nespecifikovaný mat.

Na obrázku 49 je graf závislosti opotřebení na čase pro první nespecifikovaný materiál s vyznačeným optimálním opotřebením, na jehož základě proběhl odečet optimální trvanlivost bříty uvedený v tabulce č. 19.

Tabulka 19: Odečtená hodnota trvanlivosti pro VB_{opt}

Trvanlivost [min]	
$T1_{200}$	17,8

K relativním charakteristikám patří především index obrobiteľnosti K_v , který popisuje zkrácený Taylorův vztah.

$$K_v = \frac{v_{T/VB} \text{ testovaného materiálu}}{v_{T/VB} \text{ referenčního materiálu}} = \frac{T1_{200}}{T4_{200}} = \frac{17,8}{19,2} = 0,927$$

→ dle tabulky č. 1 (hodnoty K_v indexu obrobiteľnosti pro jednotlivé třídy skupiny ocelí – kap 1.2) je možné zařadit tento testovaný materiál do třídy obrobiteľnosti **14b**.

Po dosazení trvanlivostí při řezné rychlosti 200 m.min^{-1} referenčního a zkoušeného materiálu do rovnice zjistíme, že obrobiteľnost nespecifikovaného materiálu je o 7,29 % horší než obrobiteľnost etalonu.

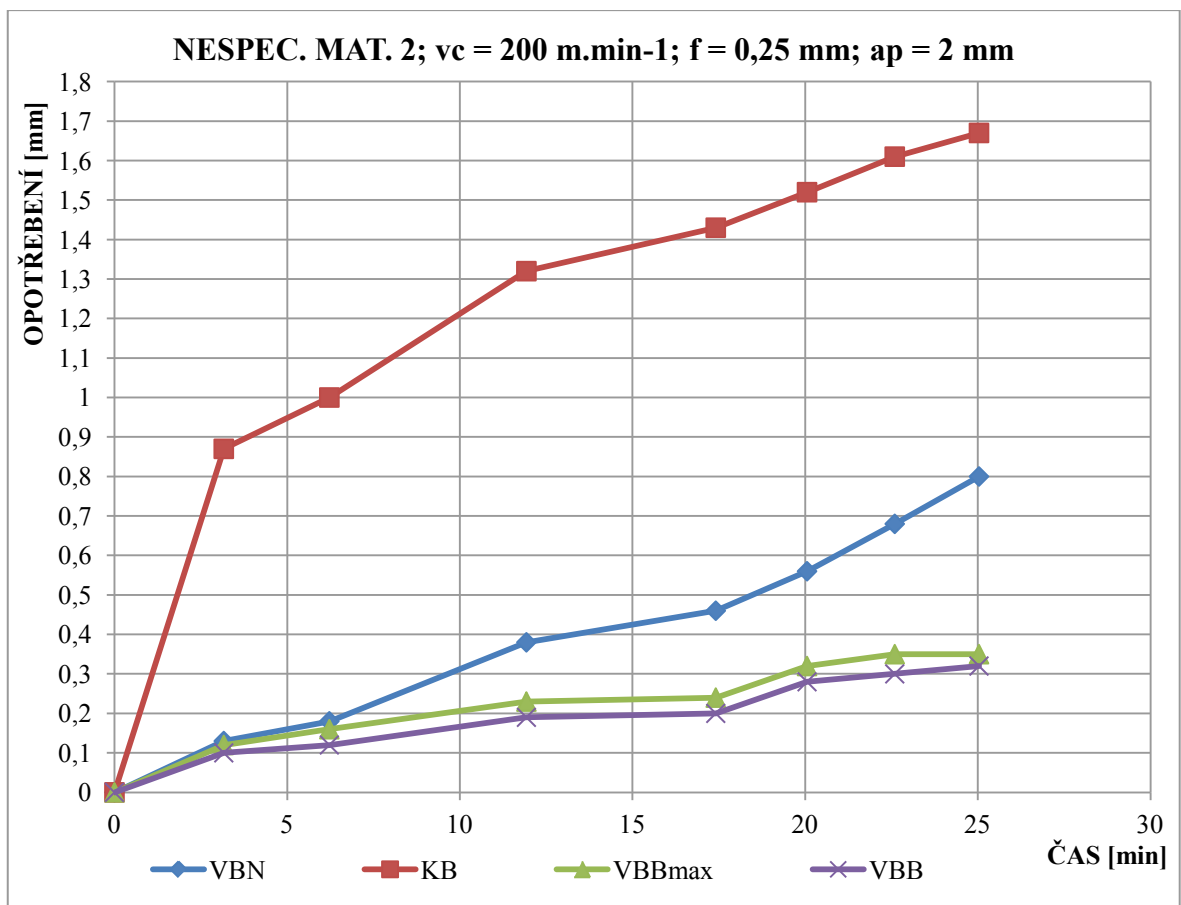
$$\frac{T2_{200}}{T4_{200}} = \frac{8,56}{19,2} \cdot 100 = 92,7 - 100 = \mathbf{7,29 \%}$$

3.2.2 Materiál č. 2

Materiál neznámých vlastností a chemického složení byl upnut stejně jako referenční materiál (sklíčidlo - podepření hrotem). Jeho rozměry: ϕ 80-660 mm.

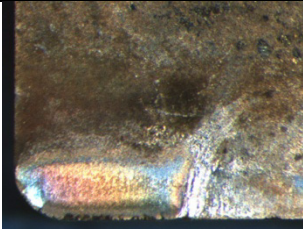
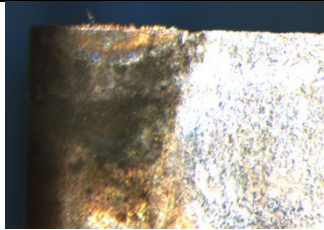
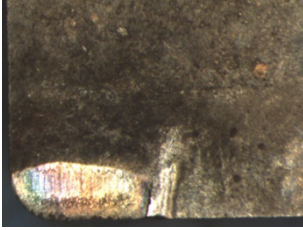
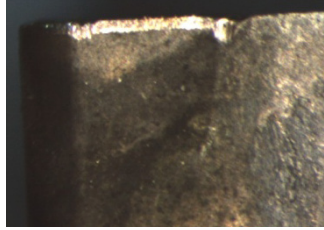
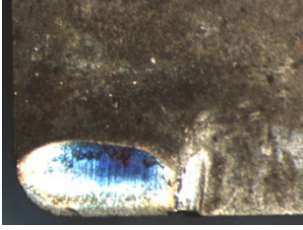
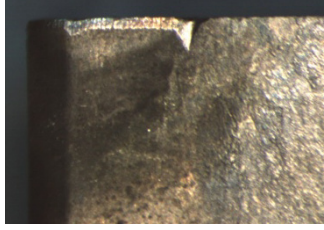
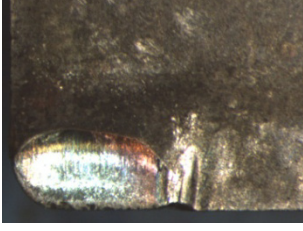
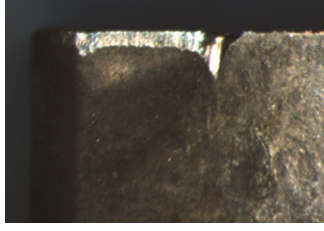
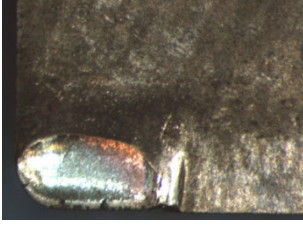
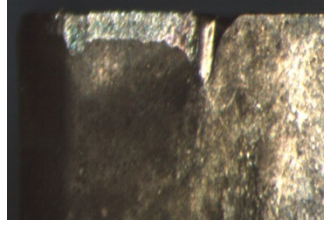

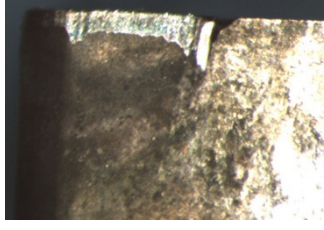
Celkem bylo provedeno 9 řezů, celková délka obrábění 3 159 mm. Čas, po který nástroj řezal třísku do stanovené míry opotřebení, byl 11,93 min. Vzhledem k faktu, že tento materiál byl obroben na kritický průměr 44 mm, byl proveden pouze test řeznou rychlostí $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Na menší průměr nebylo možno obrábět z důvodu použití přípravku zhotoveného pro dynamometr Kistler, který svými rozměry omezuje pracovní rozsah stroje.

Pro tento materiál byl vytvořen graf závislosti opotřebení na čase (obrázek č. 50) a graf závislosti drsnosti povrchu na čase, který je na obrázku č. 51.

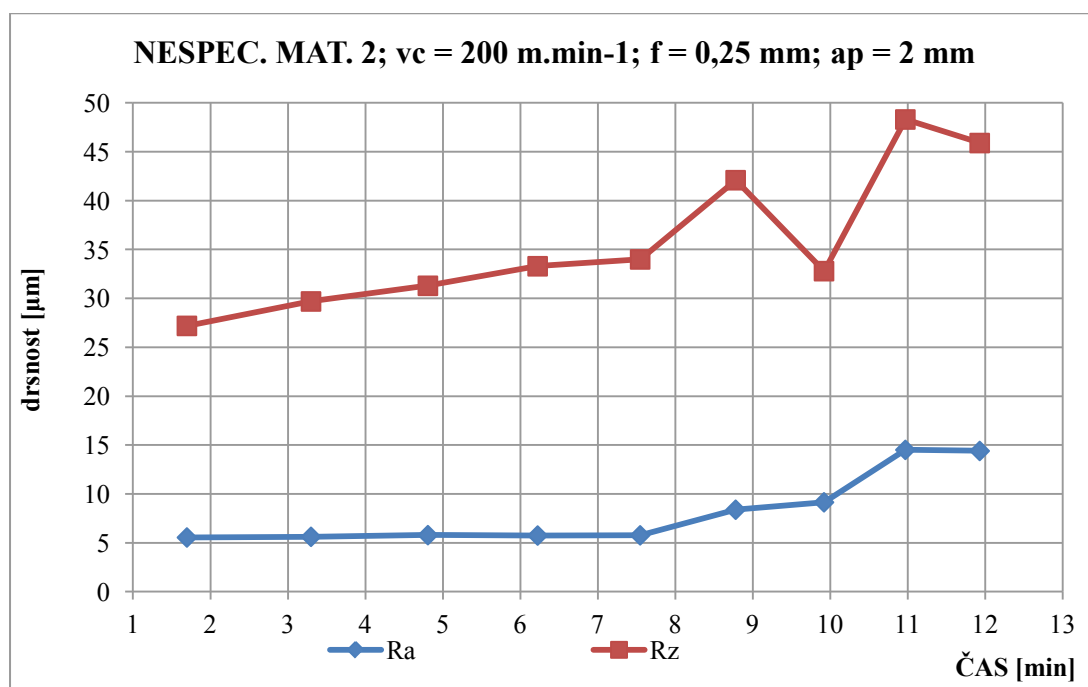


Obr. 50: Graf závislosti opotřebení na čase – nesp. mat. č. 2

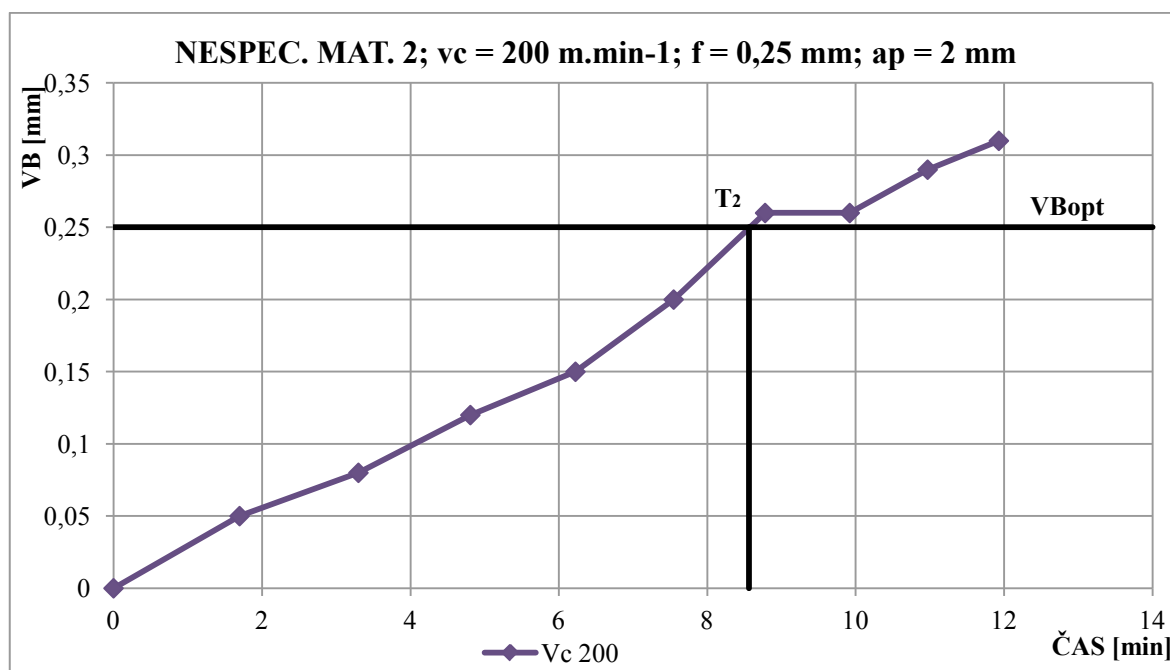
Tabulka 20: Ukázka průběhu opotřebení nástroje pro nesp. mat. č. 2

ČAS OBRÁBĚNÍ [min]	čelo nástroje	hřbet nástroje
2,05		
4,2		
6,23		
8,78		
9,92		
11,93		

Drsnost povrchu po obrábění dosahovala velmi příznivých hodnot R_a , většinou okolo $6 \mu\text{m}$ v závěru obrábění dochází ke zhoršení (viz obrázek č. 51). Parametr drsnosti R_z postupně stoupal až k hodnotě $50 \mu\text{m}$. Opotřebení nástroje probíhalo velmi podobně jako u předchozího materiálu.(tabulka č. 20)



Obr. 51: Drsnost povrchu v čase – nesp. mat. č. 2



Obr. 52: Graf VB – t pro nesp. mat. č. 2

Tabulka 21: Odečtená hodnota trvanlivosti pro VB_{opt}

Trvanlivost [min]	
T2 ₂₀₀	8,56

Na obrázku 51 je graf závislosti opotřebení na čase pro druhý nesp. mat. č. 2 s vyznačeným optimálním opotřebováním, na jehož základě proběhl odečet

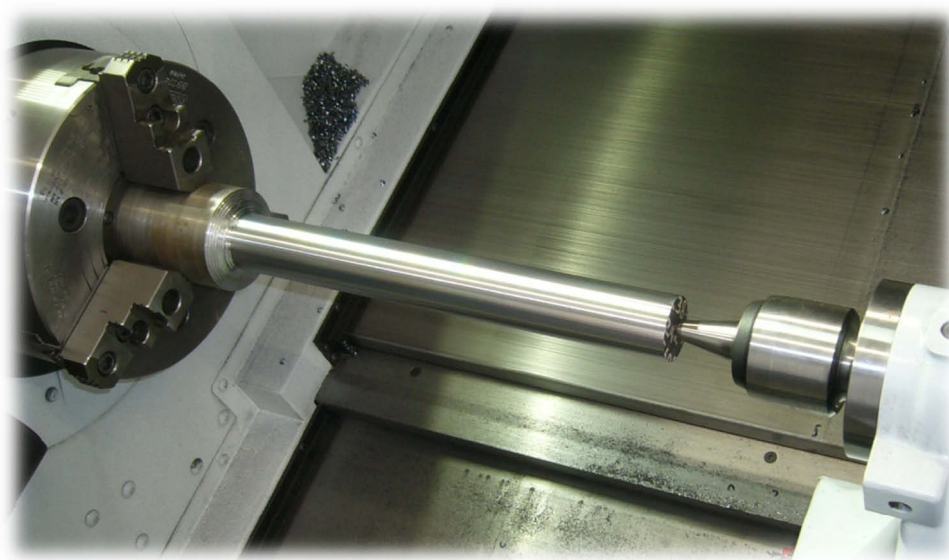
optimální trvanlivosti břitu uvedený v tabulce č. 21. Index obrobiteľnosti K_v , který popisuje zkrácený Taylorův vztah:

$$K_v = \frac{v_{T/VB} \text{ testovaného materiálu}}{v_{T/VB} \text{ referenčního materiálu}} = \frac{T_{200}}{T_{400}} = \frac{8,56}{19,2} = 0,445$$

→ dle tabulky č. 1 (hodnoty K_v indexu obrobiteľnosti pro jednotlivé třídy skupiny ocelí - kap 1.2) je možné zařadit tento testovaný materiál do třídy obrobiteľnosti **11b**.

$$\frac{T_{200}}{T_{400}} = \frac{8,56}{19,2} \cdot 100 = 44,58 - 100 = \mathbf{55,41 \%}$$

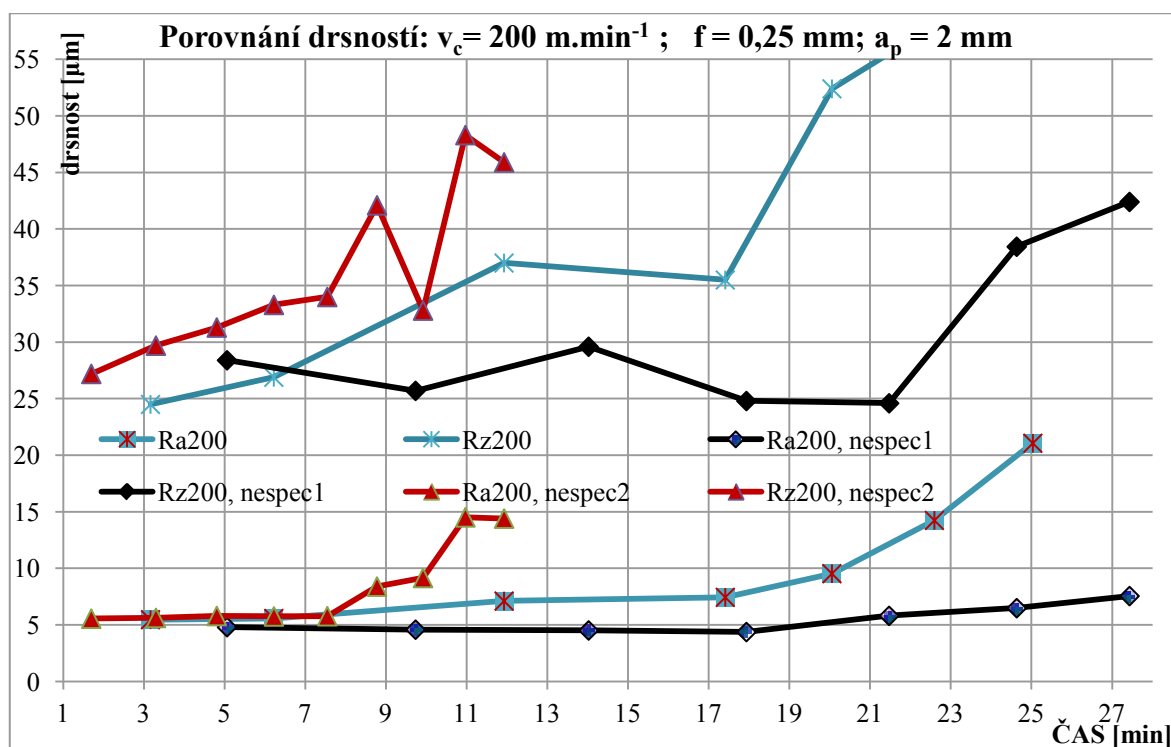
Po dosažení trvanlivostí při řezné rychlosti 200 m.min^{-1} referenčního a zkoušeného materiálu do rovnice zjistíme, že obrobiteľnost nespecifikovaného materiálu je o 55,4 % horší než obrobiteľnost etalonu.



Obr. 53: Nespecifikovaný materiál po provedení testu

3.3 Porovnání materiálů dle dosažené drsnosti povrchu

Na obrázku č. 54 je graf zobrazující naměřené hodnoty drsnosti povrchu během obrábění etalonového materiálu řeznou rychlostí 200 m.min^{-1} a obou nespecifikovaných materiálů při stejné řezné rychlosti.



Obr. 54: Porovnání drsností povrchu pro řeznou rychlost 200 m.min^{-1}



















Nejlepší drsnosti povrchu bylo dosaženo při obrábění nespecifikovaného materiálu č. 1, kde hodnota parametru Ra, do optimálního kritéria opotřebení, nepřekročila hodnotu 5 µm , stejně na tom byl parametr Rz, kde se hodnoty pohybovaly v rozmezí od 25 do 30 µm . Podobný vývoj je v podstatě u všech ostatních materiálů. Lze konstatovat, že po dosažení optimálního kritéria dochází téměř vždy k nárůstu hodnot.

3.4 Tříška a její tvar při obrábění

V tabulce č. 22 jsou fotografie třísek, vždy pro každou řeznou rychlost tak, jak se v čase obrábění tvořila, měnila. Na obrázku jsou fotografie třísek jak etalonového materiálu, tak obou nespecifikovaných materiálů. Tvorba třísky je velmi složitý proces, který se odvíjí především od mechanických vlastností obráběného materiálu, a není cílem této práce dokonalé hodnocení a studium třísky.

Během testů byla zaznamenána tříška stužková smotaná, která má velký objemový součinitel, a není tak žádoucí. Dalšími tvary třísky byly např. spirálové, obloukovité spojené, až téměř elementární. Na počátku a na konci obrábění byla tendence tvorby delší, obloukovité třísky.

Tabulka 22: Tvar třísky během obrábění

	v_c [m.min ⁻¹]	ZAČÁTEK	PRŮBĚH	KONEC
ETALON	100			
	125			
	160			
	200			
NESPECIF. MAT.1	200			
NESPECIF. MAT.2	200			

4. Závěr

Tématem diplomové práce bylo určení obrobitelnosti nespecifikovaného materiálu.

V první kapitole byl proveden teoretický rozbor problematiky obrobitelnosti ocelí z různých hledisek. Teoretická část pojednává o vlivu mechanických vlastností a chemického složení na obrobitelnost, popisuje značení a rozdělení materiálů do skupin a tříd obrobitelnosti. Byl popsán postup určování skupin obrobitelnosti dle normativů. Dále byly popsány zkoušky a metody pro zjišťování obrobitelnosti. Práce popisuje především dlouhodobé zkoušky obrobitelnosti, resp. řezivosti, které vycházejí z normy ISO 3685: 1993. Dále byly popsány některé krátkodobé zkoušky obrobitelnosti, a to zejména zkouška založená na sledování sil při obrábění. Další kapitola je zaměřena na opotřebení řezných materiálů, jsou zde uvedeny základní typy a mechanismy opotřebení.

Byla popsána soustava stroj - nástroj - obrobek - přípravek. Následovalo zpracování naměřených hodnot a vyhodnocení experimentu.

Experiment probíhal na soustružnicko-frézovacím centru značky DMG MORI, typu NLX2500/700. Další nezbytnou součástí byl dílenský mikroskop pro sledování a měření velikosti opotřebení nástroje. Dalším použitým zařízením byl přístroj zn. Kistler, kterým byly zaznamenávány silové projevy při obrábění. Měřením sil pomocí dynamometru Kistler a jejich vyhodnocením se zabývá bakalářská práce studenta Vojtěcha Blažence.

Samotný experiment probíhal ve třech fázích. V první fázi byl otestován referenční materiál 12 050.1 čtyřmi řeznými rychlostmi (100; 125; 160; 200 m.min⁻¹), za konstantní hodnoty posuvu (0,25 mm.ot⁻¹) a hloubky záběru (0,2 mm). Pro každou řeznou rychlost byly průběžně měřeny a zaznamenány hodnoty velikosti opotřebení břitu, jejichž vyhodnocení bylo uvedeno v podobě grafů, a v průběhu obrábění byly odebírány vzorky třísek k hodnocení a porovnání. Ve druhé fázi byl sestaven graf závislosti velikosti opotřebení na čase obrábění pro každou řeznou rychlost. Kritérium opotřebení optimální (VB_{opt}) bylo z několika důvodů zvoleno na hranici 0,25 mm. Na základě tohoto kritéria proběhl odečet trvanlivostí pro každou řeznou rychlost a byl

sestaven graf závislosti trvanlivosti na řezné rychlosti $T - v_c$ v logaritmických souřadnicích. Třetí fáze probíhala za stejných řezných podmínek na dvou nespecifikovaných materiálech, pouze pro řeznou rychlost 200 m.min^{-1} (z důvodu nedostatku materiálu). Opět byly sestaveny grafy závislostí opotřebení na čase obrábění a závislosti drsnosti povrchu na čase obrábění. Dle zkráceného Taylorova vztahu byly vypočítány indexy obrobiteľnosti a neznámé materiály byly zařazeny do příslušných tříd obrobiteľnosti.

Na závěr je uvedeno porovnání vývoje drsnosti povrchu etalonového materiálu a dvou nespecifikovaných materiálů při řezné rychlosti 200 m.min^{-1} . Poslední kapitola ve stručnosti zobrazuje třísku a její vývoj a tvar během obrábění, při všech použitých řezných rychlostech.

5. Seznam použité literatury

- [1] PŘIKRYL, Z. - MUSILÍKOVÁ, R.: Teorie obrábění. 3. opravené vydání, Praha: SNTL Praha, 1982
- [2] BILÍK, O. *Obrábění 1, 1. díl.* Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 2001. 136s. ISBN 80-7078-811-9
- [3] AB SANDVIK COROMANT. *Příručka obrábění – Kniha pro praktiky.* Praha: Sandvik CZ, s. r. o., 1997. 811s. ISBN 91-97 22 99-4-6
- [4] JEDNOTNÉ NORMATIVY. *Obrobitelnost materiálu CNN 10-0-0/I.* Praha 1977
- [5] ČSN ISO 513 (220801): *Klasifikace a použití tvrdých řezných materiálů k obrábění kovů určeným ostrím - Označování skupin a podskupin použití.* Praha: Český normalizační institut, 2006. 8s.
- [6] THELNING, Karl-Erik a SECO. *Steel and its heat treatment: Bofors handbook.* Boston: Butterworths, 1975, 570 p. ISBN 04-087-0651-1.
- [7] BRYCHTA, J., ČEP, R., SADÍLEK, M., PETŘKOVSKÁ, L., NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění.* Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2007. 251s. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [8] STAHL, Jan-Eric a SECO. *Metal cutting theories and models.* Suède (Lund University, Box 118, 221 00 Lund, Sweden): Division of Production and Materials Engineering, 2012. ISBN 978-916-3713-361.
- [9] Electroniccatalog [online]. Vancouver: Kyocera industrial corp., 2011. Dostupný z WWW: http://americas.kyocera.com/kicc/pdf/ceramics_brochure.pdf
- [10] Avdovic, P. ; Xu, L. H. ; Andersson, M. et al. (2011). *Evaluating the Machinability of Inconel 718 Using Polar Diagrams.* Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-Transactions of the Asme. 133 (7) Nr. 139635

- [11] Nygren, E., Folke, G., Molin, S., Ljungberg, L., *Sandvikens Handbok: Järnets och stålets metalografi*, Esselte Tryck, Stockholm, Sweden, 1970.
- [12] Anderson, M. and Stahl, J-E.: *Polar machinability diagram – a model to predict the machinability of workpiece material*, Proceedings of the 1st International Swedish Production Symposium, Göteborg 2007
- [13] LUNDHOLM, Thomas. KTH Royal Institute of Technology: FFI Sustainable gear transmission realization. [online]. 2012 [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: http://130.237.56.41/mediawiki/index.php/FFI_Sustainable_gear_transmission_realization
- [14] KOCMAN, Karel. *Technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001, 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
- [15] VASILKO, Karol. *Analytická teória trieskového obrábania*. Fakulta výrobných technológií TU v Košiciach, so sídlom v Prešove. Košice: COFIN Prešov, 2007. ISBN 978-80-8073-759-7.
- [16] HUMÁR, Anton. *Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění*. 1. vyd. Brno: CCB, 1995, 265 s. ISBN 80-85825-10-4.
- [17] SHAW, Milton Clayton. *Metal cutting principles*. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 2005, xix, 651 s. ISBN 01-951-4206-3.
- [18] VASILKO, K., NOVÁK – MARCINČIN, J., HAVRILA, M. *Výrobné inžinierstvo*. Prešov: Technická univerzita v Košiciach, Fakulta výrobných technológií so sídlom v Prešove, 2003. 424 s. ISBN 80-7099-995-0.
- [19] ISO 3685:1993. *Tool Life Testing with Single Point Turning Tools*. 1993.
- [20] HUMÁR, A. *Technologie i technologie obrábění*: 1. část. Brno: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003. 138 s. Studijní opory pro magisterskou formu studia "Strojírenská technologie".

- [21] KOČMAN, K a PROKOP, J. *Technologie obrábění*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství: 2. vyd. Brno: CERM, 2005, 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
- [22] ČEP, R. *Zkoušky nástrojů z řezné keramiky v podmínkách přerušovaného řezu*: Disertační práce. Ostrava: FS VŠB-TU Ostrava, 2005. 101 s.
- [23] ČEP, R. - VRBA, V. *Přehled zkoušek řezných materiálů při přerušovaném řezu*. In *Strojářská Technológia 2004, IV. Medzinárodná vedecká konferencia pre doktorandov, školiteľov a pracovníkov z praxe*. Súdov: Žilinská Univerzita v Žiline, 2004. ISBN 80-8070-300-0.
- [24] ISO 513 : 2002. *Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges* – Designation of the main groups and groups of application. 2002
- [25] SANDVIK Coromant, Technical Editorial Department. *Modern Metal Cutting – A Practical Handbook*. Tofers Tryckery AB, Sweden, 1994, 927 p. ISBN 91-972290-0-3.
- [26] Příručka obrábění [online]. Šumperk: Pramet Tools, s.r.o., 2004. [cit. 2013-03-23] Dostupné z WWW: http://ns.pramet.com/download/katalog/pdf/prirucka_cz.pdf, 100s.

6. Seznam obrázků a tabulek

Obr. 1: Tepelná vodivost k_w a tepelná difuzivita a_w různých materiálů [8].....	15
Obr. 2: Vztahy mezi některými vlastnostmi ovlivňujícími obrobitelnost ocelí[6]	18
Obr. 3: Zvýšení tvrdosti oceli přidáním některých prvků [6]	18
Obr. 4: Binární diagram železo – uhlík [11]	19
Obr. 5: Příklady polárních diagramů pro klasifikaci obrobitelnosti materiálu z pohledu materiálových vlastností [13].....	24
Obr. 6: Křivky opotřebení pro čtyři různé řezné rychlosti [7].....	31
Obr. 7: Určení trvanlivosti na základě zvoleného kritéria opotřebení [7]	31
Obr. 8: Závislost trvanlivosti břitů na řezné rychlosti v logaritmických souřadnicích[7] ...	32
Obr. 9: Zlogaritmovaný T- v_c diagram	33
Obr. 10: Měření teploty řezání pomocí pyrometru	35
Obr. 11: Vliv řezných podmínek na velikost opotřebení [20]	37
Obr. 12: Oblasti opotřebení na VBD [24].....	38
Obr. 13: Hlavní mechanismy opotřebení břitů [25].....	38
Obr. 14: Klasifikace typů opotřebení [3]	40
Obr. 15: Opotřebení na hřbetu břitů [3].....	41
Obr. 16: Žlábek na čele nástroje [3]	41
Obr. 17: Vydrolování ostří nástroje [3]	42
Obr. 18: Plastická deformace břitů nástroje [3].....	42
Obr. 19: Tvorba vrubu na břitu nástroje [3].....	43
Obr. 20: Opotřebení – tvorba nárůstku [3]	43
Obr. 21: Hřebenové trhlínky na ostří nástroje [3].....	44
Obr. 22: Vylomení břitů nástroje [3]	45
Obr. 23: Kritéria opotřebení dle ISO 3685: 1993 [19]	46
Obr. 24: Diagram časové závislosti opotřebení na hřbetu a čele [26]	47
Obr. 25: Použitý stroj.....	49
Obr. 26: Destička použitá při experimentu	50
Obr. 27: Držák VBD s destičkou	51
Obr. 28: Typ upnutí VBD – ISO C [26]	52
Obr. 29: Příprava polotovaru pro experiment	54
Obr. 30: Nespecifikované materiály před a po obrobení	54
Obr. 31: Sestava dílenského mikroskopu a stolního počítače	55

Obr. 32: Mitutoyo Surftest 211 při měření	56
Obr. 33: Závislosti opotřebení na čase pro $v_c = 100 \text{ m.min}^{-1}$	58
Obr. 34: Zastavení obrábění v délce $L = 89 \text{ mm}$ (2,16 min) od čela	59
Obr. 35: Vývoj tvaru třísky od počátku po konec obrábění.....	59
Obr. 36: Závislost drsnosti povrchu na čase pro $v_c = 100 \text{ m.min}^{-1}$	61
Obr. 37: Průběh opotřebení na čase pro $v_c = 125 \text{ m.min}^{-1}$	62
Obr. 38: Závislost drsnosti povrchu na čase pro $v_c = 125 \text{ m.min}^{-1}$	64
Obr. 39: Závislosti opotřebení na čase pro $v_c = 160 \text{ m.min}^{-1}$	65
Obr. 40: Závislost drsnosti povrchu na čase pro $v_c = 160 \text{ m.min}^{-1}$	67
Obr. 41: Závislosti opotřebení na čase pro $v_c = 200 \text{ m.min}^{-1}$	68
Obr. 42: Závislost drsnosti povrchu na čase pro $v_c = 200 \text{ m.min}^{-1}$	70
Obr. 43: Graf závislosti $VB = f(t)$ pro všechny řezné rychlosti.....	71
Obr. 44: Graf závislosti $T - v_c$	72
Obr. 45: Graf závislosti $\log T - \log v_c$	72
Obr. 46: Nespecifikovaný materiál, upnutí.....	73
Obr. 47: Graf závislosti opotřebení na čase	74
Obr. 48: Vývoj drsnosti povrchu na čase obrábění.....	75
Obr. 49: Graf $VB - t$ pro nespecifikovaný mat.	76
Obr. 50: Graf závislosti opotřebení na čase – nesp. mat. č. 2	77
Obr. 51: Drsnost povrchu v čase – nesp. mat. č. 2.....	79
Obr. 52: Graf $VB - t$ pro nespecifikovaný mat. č. 2.....	79
Obr. 53: Nespecifikovaný materiál po provedení testu	80
Obr. 54: Porovnání drsností povrchu pro řeznou rychlost 200 m.min^{-1}	81
 Tabulka 1: Hodnoty K_v indexu obrobitelnosti pro jednotlivé třídy skupiny ocelí [7]	26
Tabulka 2: Doporučené etalonové materiály pro danou třídu obrobitelnosti[7]	27
Tabulka 3: Doporučené etalonové oceli [7].....	27
Tabulka 4: Porovnání obrobitelnosti dle ČSN a DIN [7]	27
Tabulka 5: Ukázka tabulky pro stanovení koeficientu chem. složení ocelí [4].....	28
Tabulka 6: Příklad výpočtu třídy obrobitelnosti[4]	29
Tabulka 7: Popis k obrázku č. 22.....	46
Tabulka 8: DMG MORI NLX 2500MC/700 - základní technické parametry	49
Tabulka 9: Vlastnosti a základní chemické složení	50
Tabulka 10: Rozměry držáku CERADEX XCSRNR2525M-1207SEN [9].....	51
Tabulka 11: Chemické složení oceli 12 050.....	53

Tabulka 12: Mechanické vlastnosti oceli 12 050.1.....	53
Tabulka 13: Ukázka průběhu opotřebení nástroje pro $v_c = 100 \text{ m.min}^{-1}$	60
Tabulka 14: Ukázka průběhu opotřebení nástroje pro $v_c = 125 \text{ m.min}^{-1}$	62
Tabulka 15: Ukázka průběhu opotřebení nástroje pro $v_c = 160 \text{ m.min}^{-1}$	66
Tabulka 16: Ukázka průběhu opotřebení nástroje pro $v_c = 200 \text{ m.min}^{-1}$	68
Tabulka 17: Odečtené hodnoty trvanlivostí.....	71
Tabulka 18: Ukázka průběhu opotřebení nástroje – nespecifikovaný mat. č. 1	74
Tabulka 19: Odečtená hodnota trvanlivosti pro VB_{opt}	76
Tabulka 20: Ukázka průběhu opotřebení nástroje pro nesp. mat. č. 2.....	78
Tabulka 21: Odečtená hodnota trvanlivosti pro VB_{opt}	79
Tabulka 22: Tvar třísky během obrábění.....	82